

УДК 534.2

**ТЕРМОСТАБИЛЬНЫЕ МНОГОГРАННЫЕ ЗВУКОПРОВОДЫ
ИЗ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КВАРЦА
ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ**

Голик А. В., Королюк А. П., Мацаков Л. Я.

Предложен точный метод нахождения конфигураций многогранных звукопроводов для ультразвуковых линий задержки, основанный на решении уравнений, описывающих распространение звука в упруго-анизотропных средах. Метод применен для расчета звукопроводов из монокристаллического кварца.

Среди разнообразных ультразвуковых линий задержки на объемных волнах особое место занимают многогранные линии задержки [1]. Использование в звукопроводах многогранных линий задержки монокристаллических материалов, в частности монокристаллического кварца, позволяет существенно улучшить их характеристики и расширить возможности применения.

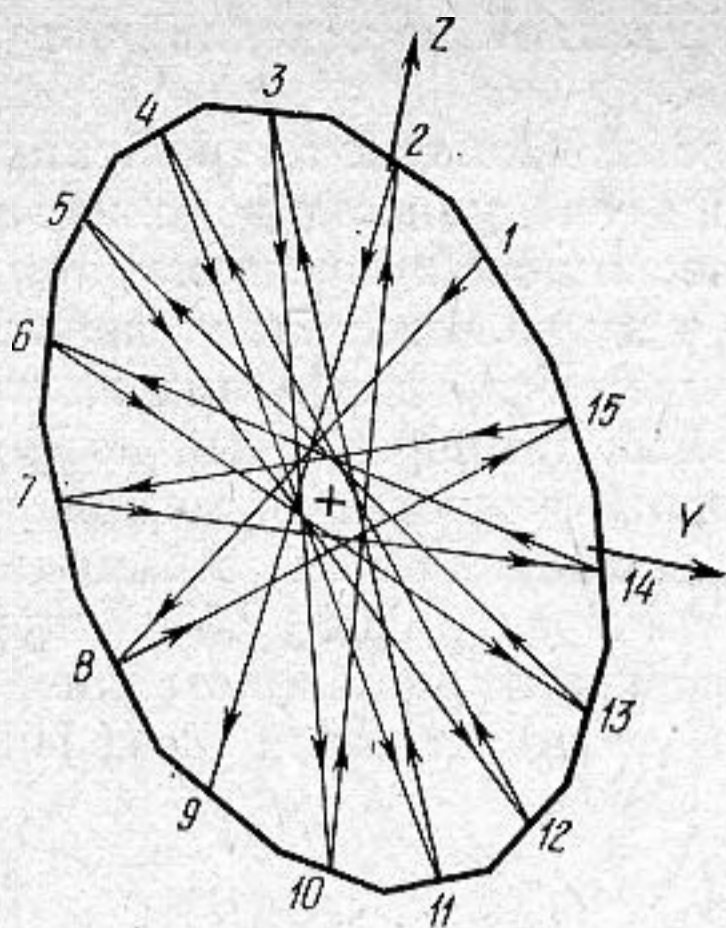
Сложность расчета монокристаллических звукопроводов обусловлена тем, что при распространении звука в упруго-анизотропной среде направление распространения энергии (групповой скорости) в общем случае не совпадает с направлением волнового вектора [2]. Известная методика расчета звукопроводов многогранных линий из монокристаллического кварца [3] является приближенной и не может быть использована для расчетов звукопроводов с большим числом граней и временем задержки больше 1 мс, когда длина пути звукового луча достигает нескольких метров.

Поэтому в настоящей работе были поставлены следующие задачи: построить алгоритм точного расчета многогранных монокристаллических звукопроводов, основанный на решении уравнений, описывающих распространение звука в упруго-анизотропных средах; исследовать возможности термокомпенсации времени задержки сигнала в звукопроводах с произвольным числом граней.

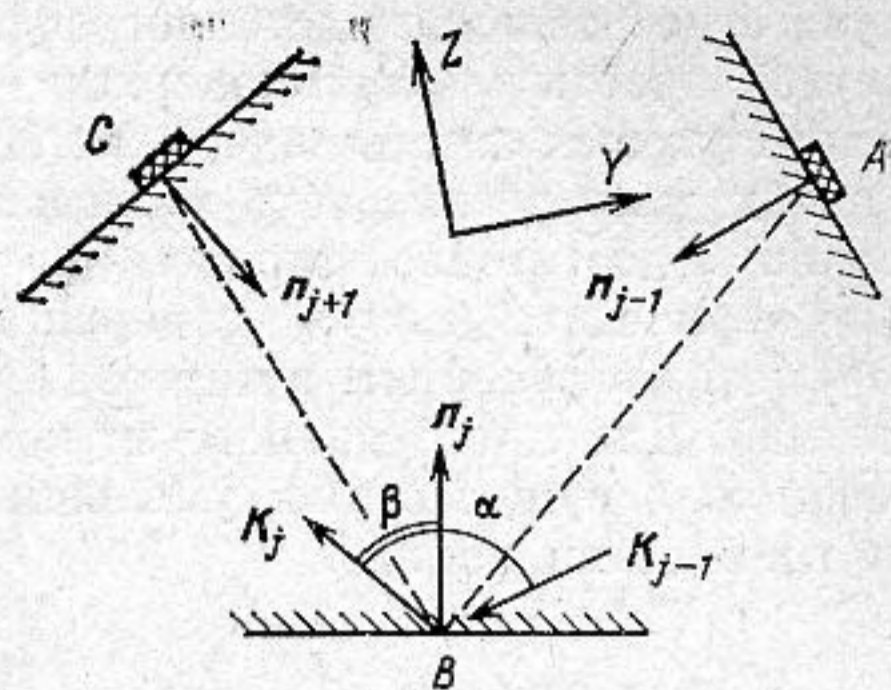
В качестве рабочей моды в звукопроводах из кристаллического кварца или других материалов с тригональной решеткой обычно используется сдвиговая акустическая волна, поляризованная по электрической оси X и распространяющаяся в плоскости механической Y и оптической Z осей. При такой конфигурации рабочая мода не уходит из плоскости YZ и не трансформируется в другие моды звуковых колебаний при отражении от граней призмы, параллельных оси X .

Для расчета звукопровода прежде всего определим в плоскости YZ координаты точек отражения звукового луча от граней звукопровода. Для этого на окружности произвольного радиуса R равномерно расположим N точек — их координаты y_j и z_j будут равны $y_j = R \cos \varphi_j$, $z_j = R \sin \varphi_j$, где $\varphi_j = 2\pi j/N + \varphi_0$, $j = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$, а угол φ_0 определяет ориентацию всей совокупности точек относительно кристаллографических осей. Поворот $y'_j = y_j \cos \theta_0 + z_j \sin \theta_0$, $z'_j = -y_j \sin \theta_0 + z_j \cos \theta_0$ приводит к системе координат, связанной с главными акустическими осями кристалла в плоскости YZ (θ_0 — угол между осью Y и одной из акустических осей). После преобразования $y'' = y'$, $z'' = z' \times k$, $k = v_{\text{ф макс}}/v_{\text{ф мин}}$ точки отражения будут расположены на образующей эллипса с отношением полуосей, равным k ($v_{\text{ф макс}}$ и $v_{\text{ф мин}}$ — соответственно значения фазовой скорости поперечной моды вдоль большой и малой акустической осей в плоскости YZ).

Наиболее рациональный порядок отражения звукового луча от граней звукопровода изображен на фиг. 1. В случае нечетных N такая последова-



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Ход звуковых лучей в 15-гранном звукопроводе из монокристаллического кварца с температурным коэффициентом задержки $1,22 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Фиг. 2. Схема, иллюстрирующая алгоритм расчета многогранных звукопроводов из монокристаллических материалов. Передающий и приемный преобразователи расположены в точках A и C. n — векторы нормалей к граням, k_{j-1} и k_j — волновые векторы падающей и отраженной от промежуточной грани звуковой волны

тельность описывается алгоритмом: $N_j=1$, если $j=1$, $N_j=(N+3)/2-j$, если j — четное, $N_j=(N+1)-j$, если j — нечетное, где $j=1, 2, 3, \dots, (N-1)/2$; $N_j=1, 2, \dots, N$. Такой порядок обхода и выбор нечетного числа граней позволяет максимально использовать объем звукопровода.

При известном расположении точек отражения звукового луча и порядке их прохождения можно найти ориентации граней: с передающим преобразователем, промежуточных, с приемным преобразователем.

Пусть излучающий преобразователь находится в точке A с координатами y_{j-1}, z_{j-1} (фиг. 2). Вектор нормали этой грани n_{j-1} , параллельный волновому вектору звука k_{j-1} , должен быть направлен таким образом, чтобы осуществлялся перенос энергии звуковой волны из точки A в точку B с координатами y_j, z_j . Для этого нужно решить уравнение $(z_j - z_{j-1}) / (y_j - y_{j-1}) = v_z(k_{j-1}) / v_y(k_{j-1})$ относительно $k_{j-1} \parallel n_{j-1}$ и тем самым найти ориентацию грани с передающим преобразователем. В этом уравнении v_y и v_z компоненты групповой (лучевой) скорости звука, которые для кварца равны $v_y = (\rho v_\phi)^{-1} \{ l_2 C_{66} + l_3 C_{14} + 4\pi (l_2^2 \epsilon_{11} + l_3^2 \epsilon_{33})^{-2} \times [l_2 (l_2 e_{11} + l_3 e_{14}) (2l_2 e_{11} + l_3 e_{14}) (l_2^2 \epsilon_{11} + l_3^2 \epsilon_{33}) - l_2 e_{11} (l_2^2 e_{11} + l_2 l_3 e_{14})^2] \}$, $v_z = (\rho v_\phi)^{-1} \{ l_3 C_{44} + l_2 C_{14} + 4\pi (l_2^2 \epsilon_{11} + l_3^2 \epsilon_{33})^{-2} \times [l_2^2 e_{14} (l_2 e_{11} + l_3 e_{14}) (l_2^2 \epsilon_{11} + l_3^2 \epsilon_{33}) - l_3 e_{33} (l_2^2 e_{11} + l_2 l_3 e_{14})^2] \}$, где $v_\phi = \{ \rho^{-1} [l_2^2 C_{66} + l_3^2 C_{44} + 2l_2 l_3 C_{14} + 4\pi (l_2^2 e_{11} + l_2 l_3 e_{14})^2 / (l_2^2 \epsilon_{11} + l_3^2 \epsilon_{33})] \}^{1/2}$. Здесь l_2 и l_3 — направляющие косинусы волнового вектора k , C_{ik} — модули упругости, e_{im}, ϵ_{pq} — пьезоэлектрические и диэлектрические постоянные.

Для нахождения направления вектора нормали n_j промежуточной грани нужно найти направление волнового вектора k_j из уравнения $(z_{j+1} - z_j) / (y_{j+1} - y_j) = v_z(k_j) / v_y(k_j)$, а затем из системы уравнений $\sin \beta / v_\phi(k_j) = \sin \alpha / v_\phi(k_{j-1})$, $\alpha + \beta = \varphi_{k_j} - \varphi_{k_{j-1}}$ можно определить углы

$$\alpha = \arctg \{ \sin(\varphi_{k_j} - \varphi_{k_{j-1}}) / [\cos(\varphi_{k_j} - \varphi_{k_{j-1}}) - v_\phi(k_j) / v_\phi(k_{j-1})] \}, \quad \varphi_{n_j} = \varphi_{k_j} + \alpha,$$

где φ_{n_j} и φ_{k_j} — углы, определяющие ориентации векторов n_j и k_j . Вектор нормали n_{j+1} грани с приемным преобразователем должен быть параллелен волновому вектору k_j звуковой волны, падающей на эту грань.

По известным ориентациям граней звукопровода и точкам отражения звукового луча находятся результирующие высоты граней $H_j = (y_{H_j}^2 + z_{H_j}^2)^{1/2}$, где $y_{H_j} = b_j (\tg \varphi_{n_j} + \ctg \varphi_{n_j})$, $z_{H_j} = b_j \tg \varphi_{n_j} / (\tg \varphi_{n_j} + \ctg \varphi_{n_j})$, $b_j = z_j + y_j \ctg \varphi_{n_j}$, которые ориентированы под углом $\varphi_{H_j} = \varphi_{n_j} + \pi/2$. Окончательные размеры звукопровода, соответствующие заданному времени задержки $\tau_{зад}$ определяются масштабированием $H_j = H_j \times k_\tau$, $k_\tau = \tau_{зад} / \tau_R$, где τ_R — вре-

мя задержки сигнала в звукопроводе, рассчитанном из исходной окружности радиуса R .

Выбор угла φ_0 при первоначальной расстановке точек отражения звукового луча на окружности, т. е. ориентации совокупности всех ходов звукового луча относительно кристаллографических осей определяет температурную стабильность времени задержки — одну из важнейших характеристик ультразвуковых линий задержки. Причем если для одних линий задержки необходимо реализовать минимальный температурный коэффициент задержки в достаточно широком диапазоне температур, то при размещении в термостате линия задержки должна иметь минимальный температурный коэффициент в интервале температур $0,01 \div 0,5^\circ$. Интересен второй случай. Для многогранного звукопровода из монокристаллического кварца возможно существенно уменьшить температурный коэффициент задержки всей линии, равный

$$\sum_{i=1}^{N-1} \tau_i T_{\tau_i} / \sum_{i=1}^{N-1} \tau_i, \quad (1)$$

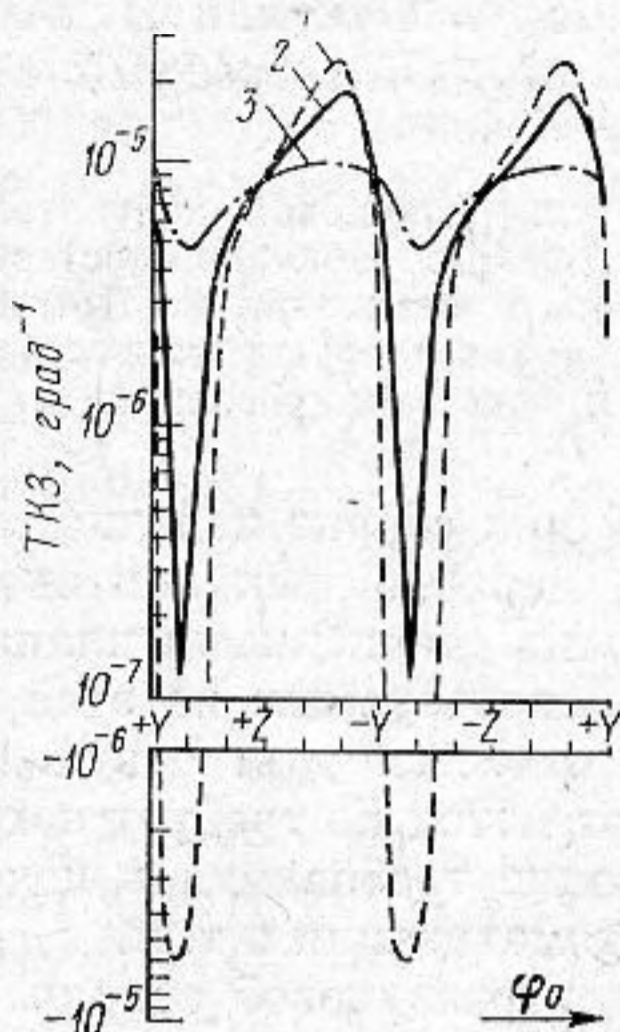
благодаря разным знакам T_{τ_i} для различных направлений распространения звукового луча [4] (τ_i — время прохождения сигнала между двумя гранями; $T_{\tau_i} = \tau_i^{-1} (\partial \tau_i / \partial T)$ — температурный коэффициент задержки на i -м проходе, сумма берется по всем проходам звукового луча). Поскольку из-за наличия пьезоэффекта времена задержки сигнала на различных проходах различаются между собой, суммарный температурный коэффициент задержки необходимо рассчитывать по формуле (1), а не пользоваться средним арифметическим температурных коэффициентов отдельных проходов, как это предполагалось в работе [3]. Величина T_{τ} выражается через температурный коэффициент линейного расширения $T_l = l^{-1} (\partial l / \partial T)$ и температурный коэффициент групповой скорости $T_{v_{гр}} = v_{гр}^{-1} (\partial v_{гр} / \partial T)$, а не фазовой, как в работе [3] — $T_{\tau} = T_l - T_{v_{гр}}$, где $T_l = T_{l_{12}} \cos^2 \varphi + T_{l_{33}} \sin^2 \varphi$, $T_{v_{гр}} = v_{гр}^{-2} [v_y (\partial v_y / \partial T) + v_z (\partial v_z / \partial T)]$.

Выражения $\partial v_y / \partial T$ и $\partial v_z / \partial T$, получаемые дифференцированием v_y и v_z по температуре, не будем приводить вследствие их громоздкости. Отметим, что в формуле для T_l величина φ — угол, под которым звуковой луч распространяется от одной грани к другой, в то время как $T_{v_{гр}}$ является функцией волнового вектора \mathbf{k} .

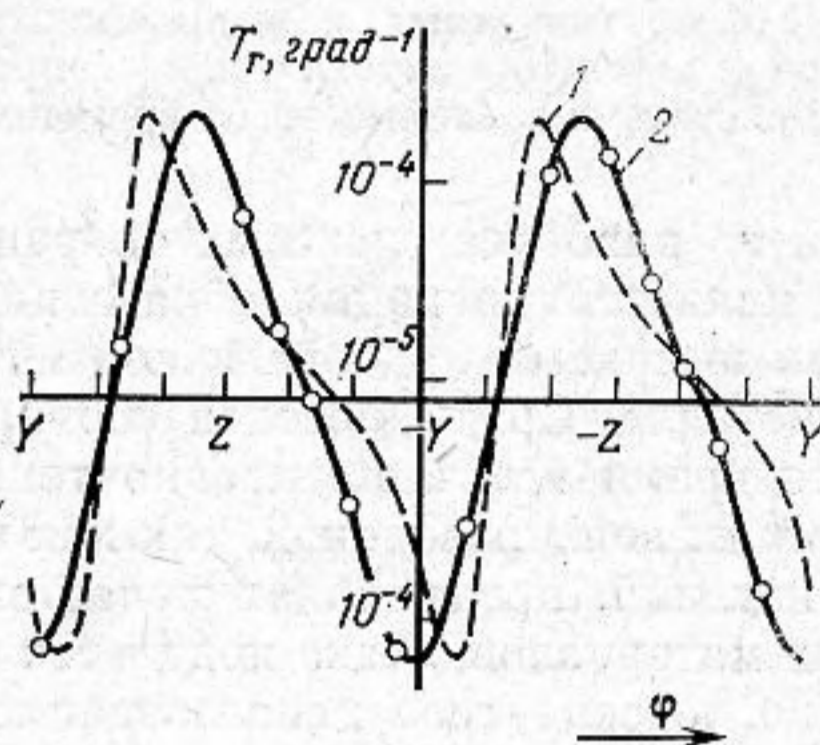
По описанной выше методике был рассчитан и изготовлен ряд многогранных звукопроводов из кристаллического кварца, оптимизированных по температурному коэффициенту задержки. В расчетах использовались параметры синтетического пьезокварца отечественного производства [5], соответствующие температуре 25°C ; диэлектрические модули считались не зависящими от температуры. В результате проведенных исследований были установлены следующие особенности в поведении температурного коэффициента задержки всего многогранного звукопровода как функции N . Для линий с небольшим числом граней, например $N=9$ (фиг. 3, кривая 1) путем подбора угла φ_0 можно добиться взаимной компенсации положительных и отрицательных величин $\tau_i T_{\tau_i}$ на различных проходах, т. е. выполнить условие равенства нулю температурного коэффициента задержки звукопровода. Но для звукопроводов с числом граней $N \geq 12$ это условие не является достижимым. Так, для $N=15$ минимальный температурный коэффициент задержки звукопровода равен $1,22 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и независимо от значения φ_0 всегда положителен, а минимальное и максимальное значения отличаются в ≈ 200 раз (фиг. 3, кривая 2). При увеличении числа граней N минимальное значение температурного коэффициента задержки увеличивается, а отношение максимального и минимального значений уменьшается (фиг. 3, кривая 3 соответствует $N=31$). Такая зависимость температурного коэффициента задержки от числа граней обусловлена угловой зависимостью температурного коэффициента T_{τ} в монокристаллическом кварце. На фиг. 4 пунктиром изображена зависимость $T_{\tau}(\varphi_{\mathbf{k}})$ от направления волнового вектора \mathbf{k} , рассчитанная по данным [5] (кривая 1).

Там же сплошной линией показана зависимость $T_{\tau}(\varphi_{гр})$ от угла $\varphi_{гр}$, под которым распространяется звуковой луч при данном k (кривая 2). Видно, что абсолютное значение больше у положительных T_{τ} и площадь под положительной частью кривой $T_{\tau}(\varphi)$ больше, чем под отрицательной. Это связано с тем, что коэффициент теплового расширения кварца положителен для всех направлений. При увеличении числа граней N суммарная выборка отдельных T_{τ_i} по функции $T_{\tau}(\varphi)$ все больше усредняется, что и приводит к упомянутым выше особенностям температурного коэффициента задержки многогранных звукопроводов.

Численные значения температурных коэффициентов задержки многогранных кварцевых звукопроводов в значительной степени обусловлены



Фиг. 3



Фиг. 4

Фиг. 3. Зависимость суммарного температурного коэффициента задержки многогранных звукопроводов от угла φ_0 для: 9-гранного звукопровода — 1; 15-гранного звукопровода — 2; 31-гранного звукопровода — 3

Фиг. 4. Зависимость температурного коэффициента задержки T_{τ} от: направления волнового вектора k звуковой волны — 1; от направления вектора групповой скорости $v_{гр}$ — 2. Кружками отмечены значения T_{τ_i} , соответствующие 15-гранному звукопроводу с минимальным температурным коэффициентом задержки $1,22 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

расположением граней. В нашем случае они описаны вокруг эллипса. Но при любой другой конфигурации звукопровода увеличение числа граней приведет к результату, сходному с полученным в данной работе.

Изготовленные по нашим расчетам многогранные линии задержки из монокристаллического кварца имели температурный коэффициент задержки в интервале температур $20 \div 60^\circ \text{C}$ в 10–40 раз меньше, чем линии, изготовленные по методике, изложенной в работе [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Eveleth J. H.* A Survey of Ultrasonic Delay Lines Operating Below 100 Mc/s.— Proc. IEEE, 1965, v. 53, № 10, p. 1406–1428.
2. *Меркулов Л. Г., Яковлев Л. А.* Особенности распространения и отражения ультразвуковых лучей в кристаллах.— Акуст. ж., 1962, т. 8, № 1, с. 99–106.
3. *Козловский К. Н., Горфункель З. Л.* Расчет термостабильных многогранных ультразвуковых линий задержки из кристаллического кварца.— Электронная техника. Сер. IX. Радиоконпоненты, 1969, вып. 2, с. 23–34.
4. *McSkimin H.* Temperature-Stable Ultrasonic Delay Lines.— Пат. США, 1959, кл. 333–30, № 2 877 431.
5. *Шевелько М. М., Яковлев Л. А.* Прецизионные измерения упругих характеристик синтетического пьезокварца.— Акуст. ж., 1977, т. 23, № 2, с. 331–332.