

УДК 621.372.412.029.55

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

В. Г. АНДРОСОВА, П. Г. ПОЗДНЯКОВ

КВАРЦЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ СДВИГОВЫХ КОЛЕБАНИЙ СО СТЕРЖНЕВЫМИ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТАМИ

(Представлено академиком Н. В. Беловым 21 XII 1972)

Среди резонаторов сдвиговых колебаний кварцевые получили наиболее широкое распространение, благодаря тому, что они охватывают большой диапазон частот от 100 кГц до 200—300 МГц и обладают высокой стабильностью частоты. Во всех практически используемых типах резонаторов сдвиговых колебаний пьезоэлементы имеют форму тонких пластин, а размер, определяющий частоту собственных колебаний, как правило, существенно отличается от других размеров, что позволяет рассматривать задачу о расчете частоты, как одномерную. В то время как колебаниям сдвига тонких кварцевых пластин посвящено очень большое число работ, колебания сдвига стержней, размеры поперечников которых соизмеримы, насколько известно, еще не исследовались ни теоретически, ни экспериментально. Большая сложность колебаний сдвига стержней создает большие возможности для улучшения электрических и эксплуатационных характеристик кварцевых резонаторов на частотах от 300 до 1000 кГц, т.е. для того диапазона, который до недавнего времени для кварцевых резонаторов считался «мертвым». Исходя из этого, авторы исследовали колебания кварцевых стержней некоторых ориентаций.

Колебания сдвига можно возбудить пьезоэлектрически в кварцевом стержне любой ориентации при соответствующем направлении электрического поля. Однако авторы ограничили исследования образцами, длина которых совпадала с направлением электрической оси (X) кварца. Выбор такой ориентации обусловлен тем, что электрическое поле, перпендикулярное оси X, возбуждает в стержне только касательные напряжения. Другого вида деформаций, кроме сдвига, при таком возбуждении не возникает ни вследствие пьезоэффекта, ни вследствие упругих связей.

На рис. 1а изображена ориентация исследуемых стержней относительно кристаллофизических осей кварца. В принятой системе такая ориентация имеет обозначение YXl/β , где β — угол между более широкой боковой гранью и оптической осью кварца. Электрическое поле, перпендикулярное оси стержня, возбуждает в нем деформацию сдвига в плоскости, параллельной оси стержня и в общем случае наклонной к плоскостям боковых граней. Такую деформацию, схематично изображенную на рис. 1б, уместно назвать косым сдвигом. Ее величина и расположение плоскости сдвига могут быть рассчитаны из соответствующего уравнения обратного пьезоэффекта:

$$z'_x = E'_y d'_{25} + E'_z d'_{35}, \quad x'_y = E'_y d'_{26} + E'_z d'_{36}. \quad (1)$$

Для рассматриваемого случая возбуждения стержня полем, перпендикулярным оси X, следует принимать во внимание следующие уравнения упругости:

$$z'_x = s'_{55} Z'_x + s'_{56} X'_y, \quad x'_y = s'_{66} X'_y + s'_{56} Z'_x. \quad (2)$$

Наличием упругого коэффициента s_{56}' обусловлена связь между компонентами касательных напряжений и деформаций сдвига в плоскостях боковых граней стержня. Коэффициент s_{56}' обращается в нуль при значениях угла среза β , равных 31 и 59° . В стержне, боковые грани которого составляют с осью Z углы 31 и 59° , упругая связь между компонентами сдвига отсутствует, и при резонансных колебаниях смещения должны происходить практически в плоскостях боковых граней (случай прямого сдвига). Исходя из сказанного, представлялось необходимым учитывать упругую связь между компонентами сдвигов z_x' и x_y' . Поскольку деформации сдвига z_x' и x_y' в стержнях, отношение поперечных размеров кото-

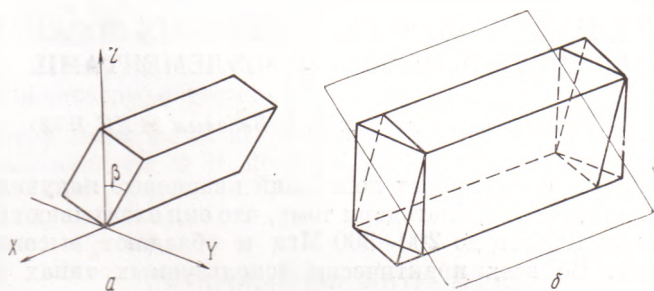


Рис. 1. а — ориентация стержня среза YXl/β относительно кристаллофизических осей кристалла кварца; б — деформация сдвига в стержне среза YXl/β при возбуждении его полем, направление которого перпендикулярно оси стержня

рых близко к единице, соизмеримы, пренебречь их взаимодействием, как это делают в случае колебаний пластин, нельзя.

При возбуждении стержня переменным электрическим полем, направленным, перпендикулярно его оси, обнаруживаются по крайней мере два резонанса, обусловленных колебаниями сдвига. При этом частота одного резонанса определяется в основном толщиной, а другого — шириной стержня. Опыт показывает, что для квадратных стержней частоты обоих колебаний практически не зависят от угла среза, а их частотные коэффициенты равны приблизительно 1670 и 2550 кгц·мм. Независимость частотных коэффициентов колебаний сдвига стержней существенно отличает их от колебаний сдвига тонких пластин, для которых характерна заметная зависимость частотных коэффициентов от угла среза — как для колебаний по толщине, так и для колебаний по контуру (ширине). Указанный характер зависимости частотного коэффициента для почти квадратных стержней объясняется значительно большим взаимодействием компонент сдвига z_x' и x_y' , чем в случае пластин.

Форма колебаний сдвига стержней изучалась посредством пылевых фигур. При возбуждении стержня, отношение размеров которого оптимально с точки зрения ослабления близких побочных колебаний, обычно наблюдается картина расположения узловых линий, для которой характерно наличие ряда параллельных поперечных линий, отстоящих на равных расстояниях друг от друга. Такие линии наблюдаются на одной паре противоположных боковых граней. На второй паре противоположных граней при этом наблюдаются продольные узловые линии, расположенные по середине этих граней. Эти линии обычно прерываются. При возбуждении второго колебания картина расположения выглядит аналогично, но там, где были поперечные линии, наблюдаются продольные, и наоборот. Рис. 2а схематично поясняет расположение узловых линий.

Поскольку одни и те же компоненты могут возбуждаться как электрическим полем E_y' , так и полем E_z' , то для более эффективного возбуждения авторы предложили ⁽¹⁻⁴⁾ использовать систему из четырех электро-

дов, расположенных на боковых гранях. Одноименные по знаку электроды могут соединяться между собой через боковые ребра, как показано на рис. 2б.

Исследования показали, что малый температурный коэффициент частоты (т.к.ч.) стержней может быть достигнут как для низкочастотных колебаний сдвига ($K_f \cong 1670$ кгц·мм), так и для высокочастотных ($K_f \cong 2550$ кгц·мм). Поскольку коэффициент α_{36}' близок к своему максимальному значению для угла среза $\pm 45^\circ$ и связь между обоими колебаниями наибольшая, следует ожидать, что для этого угла среза изменение отноше-

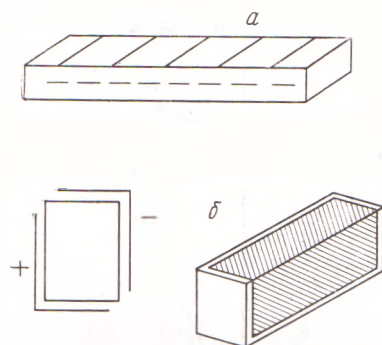


Рис. 2

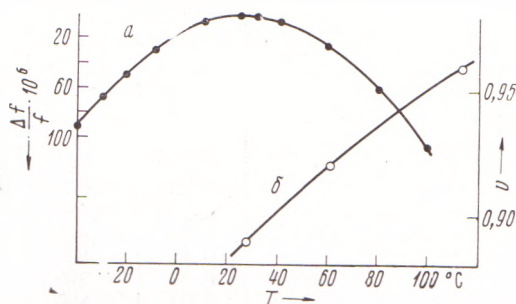


Рис. 3

Рис. 2. а — схема расположения узловых линий на гранях стержня при возбуждении одного из колебаний сдвига; б — схема расположения электродов для эффективного возбуждения колебаний сдвига в стержнях

Рис. 3. а — типичная зависимость частоты от температуры кварцевых резонаторов типа АП; $b/l = 0,223$; $f = 400$ кгц; б — зависимость точки нулевого т.к.ч. T_0 низкочастотного колебания сдвига от соотношения поперечных размеров стержня v для угла среза -45° и отношения ширины к длине $b/l = 0,23$

ния поперечных размеров стержня должно существенно влиять на зависимость частоты от температуры. Если учесть, что т.к.ч. обоих колебаний имеют разные знаки, то должны существовать такие отношения поперечных размеров стержня, при которых т.к.ч. обоих колебаний обращаются в нуль при определенной температуре и остаются малыми в достаточно широком интервале температур. Стержни с углом среза -45° исследованы наиболее подробно. Для обоих колебаний были определены отношения поперечных размеров, при которых т.к.ч. равен нулю. Поскольку низкочастотные колебания имеют заметно меньшую зависимость частоты от температуры, чем высокочастотные, то первые получили практическое использование в резонаторах. Для резонаторов этого типа было предложено обозначение АП, а для резонаторов с высокочастотным рабочим колебанием — БП. Частотно-температурная кривая у резонаторов обоих типов близка к квадратичной параболе. Квадратичный коэффициент для резонаторов типа АП составляет около $0,015 \cdot 10^{-6} (\text{°C})^{-2}$, в то время, как для резонаторов типа БП он близок к $0,04 \cdot 10^{-6} (\text{°C})^{-2}$.

Типичная зависимость частоты от температуры для резонатора типа АП приведена на рис. 3а. На рис. 3б показана зависимость положения точки нулевого т.к.ч. для пьезоэлементов типа АП от соотношения поперечных размеров, из которой видно, что небольшим изменением поперечных размеров стержня можно в широких пределах (от -50 до 100°C и более) перемещать положение вершины температурной кривой.

В стержнях, так же как и в пластинах, можно возбуждать большое число мод сдвиговых колебаний. Для электродов, покрывающих всю поверхность боковых граней, существуют вполне определенные оптимальные отношения частотного размера (для пьезоэлементов АП это ширина) к

длине, для которых активность рабочей моды максимальна, в то время как ближайшие по частоте моды максимально ослаблены и наиболее удалены от частоты рабочей моды. Этот ряд отношений такой же, как и для колебаний сдвига в пластинах АТ-среза (⁵). Относительно более короткие стержни имеют лучшие спектральные характеристики, поскольку у них частоты ближайших мод удалены больше от частоты рабочей моды, чем у более

Таблица 1

Средние значения эквивалентных электрических параметров по результатам измерений производственных партий резонаторов

Частота, кГц	Отношение размеров		Эквивалентные электрические параметры		Добротность, 10 ³
	b/l	S/b	R_k , ом	L_k , гн	
337,0	0,23	0,889	80	23,6	580
404,0	0,23	0,850	44	17,3	990
403,1	0,16	0,890	21	12,2	1490
400,5	0,13	0,890	19	10,1	1330
399,0	0,11	0,890	30	8,1	700
400,0	0,09	0,890	10	6,3	1560
399,3	0,08	0,890	10	5,3	1380
500,0	0,11	0,890	21	5,9	960
625,0	0,08	0,920	16	3,7	920
700,6	0,09	0,878	30	3,9	360
800,0	0,08	0,883	31	2,4	500
885,0	0,07	0,929	12	2,2	1100

Примечание. S — толщина, b — ширина, l — длина.

длинных стержней. Частота высокочастотного колебания у резонаторов типа АП расположена выше рабочей примерно на 60% и оказывается достаточно ослабленной креплением, что позволяет использовать резонаторы в аperiодических кварцевых генераторах. Небольшие размеры пьезоэлементов позволяют осуществлять миниатюрные резонаторы в стеклянных колбах диаметром 10 мм.

Для резонаторов типа АП характерны высокие значения добротности более 500 000, низкие значения эквивалентной индуктивности и активного сопротивления, а также независимость последнего от температуры. Ввиду малого влияния крепления резонаторы устойчивы к механическим воздействиям и имеют очень небольшое старение. В табл. 1 приведены значения электрических параметров резонаторов типа АП на различных частотах. Резонаторы характеризуются малыми разбросами температурных характеристик и эквивалентных параметров.

Поступило
29 XI 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. Г. Андросова, П. Г. Поздняков, Описание к авт. свид. на изобр. № 337907 от 1966 г. Бюлл. изобр. № 15 (1972). ² Fr. Pat., № 2 029 186, 1970. ³ U. S. Pat., М 3 588 554, 1971. ⁴ Brit. Pat., № 1 247 217, 1971. ⁵ В. Г. Андросова, В. И. Бирюков, П. Г. Поздняков, Кварцевые резонаторы с пьезоэлементами среза АТ прямоугольной формы. Электронная техника, сер. 9, в. 2, 1970, стр. 33.