

Технология повышения временной стабильности кварцевых резонаторов высокочастотного диапазона

Роман ГОШЛЯ
goshliay_roman@mail.ru
Наталья АЛЕКСЕЕВА,
к. т. н.

На примере высокочастотных кварцевых резонаторов рассматривается применение новой технологии изготовления изделий пьезоэлектроники, которая позволяет повысить временную стабильность кварцевых резонаторов и сокращает цикл их изготовления.

Современные достижения в области пьезоэлектроники позволяют изготавливать кварцевые резонаторы по основной гармонике на частоты до 400 МГц. При этом показателем качества кварцевых резонаторов, помимо точности настройки и значения динамического сопротивления, является систематический уход частоты резонатора со временем или старение кварцевых резонаторов в результате необратимого изменения свойств кристаллического элемента, системы пленочных электродов, крепления пьезоэлемента, изменения состава атмосферы внутри корпуса.

Долговременная стабильность резонансной частоты резонаторов, которую часто называют старением, зависит от свойств используемого пьезоэлектрического материала, а также ориентации, размеров, типа колебаний, обработки и конечного исполнения резонаторов.

У пьезоэлектрических кристаллических резонаторов, помещенных в вакуум или герметичный корпус (рис. 1), заполненный газом, не вызывающим коррозию электродов или поверхности пластины, в большинстве случаев происходит повышение резонансной частоты. При длительном наблюдении за резонансной частотой можно выделить два периода. В течение первоначального периода, продолжающегося от нескольких недель до нескольких месяцев, временную зависимость резонансной частоты можно описать некоторой монотонно возрастающей функцией. В течение второго периода более или менее регулярное значение резонансной частоты изменяется около постоянного или незначительно меняющегося среднего значения.

Старение указанной группы пьезоэлектрических резонаторов в начальный период может быть вызвано отделением мельчайших частиц кварцевой пластины или электродов при колебаниях, изменением упругих свойств электродов с течением времени, диффузионными процессами, протекающими в электродах и поверхностных слоях пластины, нарушенных при обработке, и т. п.

Вследствие диффузионных процессов изменяется (как правило, уменьшается) внутреннее напряжение в электродах и поверхностных слоях пластины, связанное с предварительной температурной обработкой; при этом происходит перемещение массы в те области, где колебания менее интенсивны. Влияние температурной обработки электродов настолько существенно, что может явиться причиной и обратного характера старения, то есть уменьшения резонансной частоты с течением времени.

У кварцевых резонаторов АТ-среза временную зависимость резонансной частоты в начальный момент времени можно выразить следующим образом [1]:

$$\frac{df}{dt}(f-f_{\infty}) = -K \times (f-f_{\infty}), \quad (1)$$

где f — резонансная частота в момент времени t ; f_{∞} — конечное установившееся значение частоты; K — постоянная старения. K является величиной, обратной постоянной времени, и в соответствии с выражением Аррениуса есть функция температуры:

$$K = K_0 \times e^{-E/k\Theta}, \quad (2)$$

где E — активационная энергия процесса; k — постоянная Больцмана; Θ — абсолютная температура.

Резонансная частота f_t в момент времени t может быть выражена как:

$$f_t = f_{\infty} \pm [f_0 - f_{\infty}] \times e^{-kt}, \quad (3)$$

где f_0 — частота резонанса в начальный момент старения.

На рис. 3 приведены кривые измеренной временной зависимости резонансной частоты высокочастотных кварцевых резонаторов АТ-среза с обратной мезаструктурой с резонансной частотой 60 МГц, работающих на основной механической гармонике сдвиговых колебаний по толщине и выполненных в разных корпусах, заполненных азотом.

В объеме резонаторов возможны как процессы миграции атомов металла по поверхности пьезоэлемента, так и перемещение их с поверхности пьезоэлемента на стенки корпуса и обратно; диффузия атомов электродов в кварцевый кристаллический элемент и обратно чаще всего происходит по структурным каналам. Если атомы металла диффундируют внутрь кристалла, то знак изме-

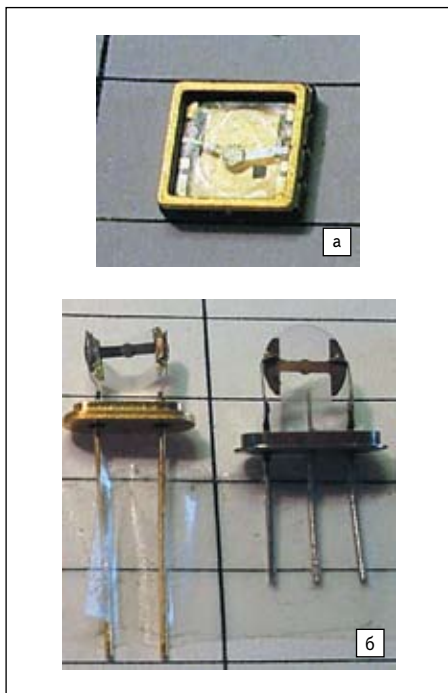


Рис. 1. Кварцевый резонатор в различном конструктивном исполнении (на фотографии — без кожуха): а) SMD-исполнение; б) корпус типа HC-45

нения частоты будет отрицательным; если из кристалла, то положительным.

При отрыве атомов металла с поверхности происходит изменение массы пьезоэлемента, и знак будет положительным [2]:

$$\Delta f/f = -(\Delta m/m), \quad (4)$$

где Δm — изменение массы кристалла; Δf — изменение частоты.

Помимо массопереноса, в кристаллическом элементе существуют и упругие напряжения, возникающие в электродном покрытии кварцевого резонатора.

На изменение резонансной частоты кварцевых резонаторов влияет качество подготовки поверхности кристаллического элемента перед нанесением электродного покрытия. В пленках, полученных методом вакуумного напыления, имеют место термические напряжения, обусловленные разными значениями коэффициентов температурного линейного расширения (ТКЛР) кварца ($\alpha_{кв} = 0,55 \times 10^6 \text{ K}^{-1}$) и электродного покрытия. (Чаще всего применяется серебро или никель: $\alpha_{ср} = 18,6 \times 10^6 \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{ник} = 14 \times 10^6 \text{ K}^{-1}$.) Эти напряжения могут привести к изменению частоты резонатора на несколько кГц.

Расчитать величину напряжений, возникающих в результате деформации электродного покрытия вследствие изменения температуры кварцевого резонатора, можно на основании выражения:

$$F = E \times \alpha \times \Delta T, \quad (5)$$

где E — модуль Юнга материала электродного покрытия, Н/м²; α — температурный коэффициент линейного расширения электродного покрытия; ΔT — разница температур кристаллического элемента до и после вакуумной металлизации.

Подставив значение силы F [Н] в выражение (6), можно определить величину изменения частоты кварцевого резонатора вследствие термических напряжений, возникающих в электродном покрытии:

$$\Delta f/f = K_F \times F/D, \quad (6)$$

где K_F — коэффициент силовосвместительности [6]; D — диаметр кристаллического элемента кварцевого резонатора, мм.

Для повышения временной стабильности частоты кварцевых резонаторов была оптимизирована технология их термотренировки после операции настройки частоты методом ионного травления перед герметизацией их в корпус.

Настройка, то есть установка номинального значения частоты кварцевого резонатора, осуществляется методом ионного травления поверхности электрода пьезоэлемента. При этом в процессе подстройки частоты резонаторов в номинал происходит одновременно и очистка поверхности пьезоэлементов резонаторов в плазме газового разряда.

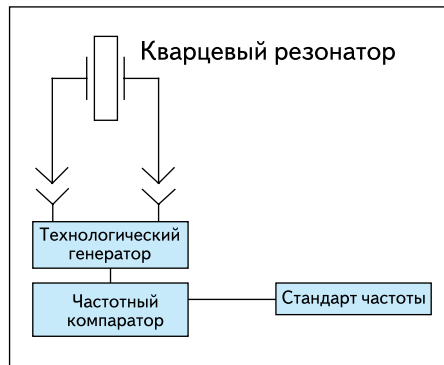


Рис. 2. Схема рабочего места для измерения резонансной частоты кварцевых резонаторов в процессе проведения термотренировки

Необходимость проведения цикла тренировок вызвана тем, что после монтажа пьезоэлементов в держатель (сборка кварцевого резонатора производится, как правило, путем приклейки пьезоэлемента к держателю токопроводящим клеем) и настройки резонаторов в номинал могут возникнуть остаточные напряжения в пьезоэлементах. Необходимо также исключить изменения частоты кварцевых резонаторов из-за газовой выделений из мест приклейки пьезоэлемента к держателю токопроводящим клеем, так как клей в качестве связки включает органические соединения, которые могут заметно влиять на величину долговременной стабильности частоты резонатора.

Герметизация кварцевых резонаторов осуществляется методом конденсаторной сварки с продувкой инертным газом.

Цикл термотренировок резонаторов проводился в непрерывно откачиваемой вакуумной камере при остаточном давлении $P \sim 1 \times 10^{-3}$ Па и нагревом резонаторов до температуры $T = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ с последующей 4-часовой площадкой при данной температуре. Затем нагрев отключали, и осуществлялось плавное остывание резонаторов до комнатной температуры. Контроль значения температуры в камере осуществлялся при помощи медного термометра сопротивления.

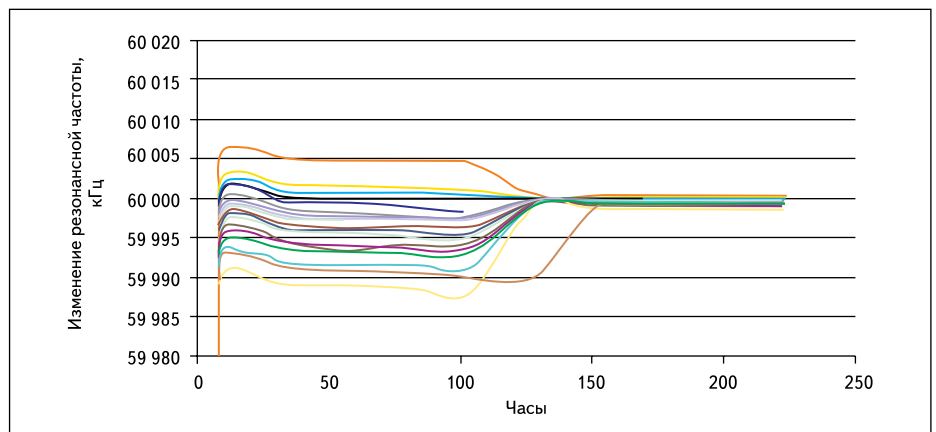


Рис. 3. Кривые зависимости изменения резонансной частоты в процессе термоциклирования

После каждого термоцикла производилось измерение частоты кварцевых резонаторов. На рис. 2 показана установка для измерения частоты кварцевых резонаторов.

На рис. 3 приведены кривые зависимости изменения частоты партии кварцевых резонаторов на частоту 60 МГц с точностью настройки $\pm 2,0$ кГц после проведения 224 часов термотренировок. Анализ этих кривых показывает, что проведение термоциклирования в течение 224 часов избыточно. Оптимальным значением времени термоциклирования является 150 ч, что подтверждается экспериментальными результатами. Для проверки долговременной стабильности частоты партии кварцевых резонаторов после 150 ч термоциклов они были подвергнуты испытанию на долговременную стабильность: старению по методике, изложенной в [4]. При этом кварцевые резонаторы помещались в термостат при температуре $85 \text{ }^\circ\text{C}$ и выдерживались в течение 150 суток. Измерение частоты резонаторов проводилось после каждых 15 суток в течение 150 дней. После математической обработки результатов суммарное изменение резонансной частоты у каждой партии составило не более $0,5 \times 10^{-6}$.

Данная методика проведения термотренировок кварцевых резонаторов позволяет повысить их качество путем повышения временной стабильности, а также сократить время изготовления этих устройств. ■

Литература

1. Зеленка И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах. Материалы, технология, конструкция, применение / Пер. с чешского. М.: Мир, 1990.
2. Смагин А. Г., Ярославский М. И. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы. М.: Энергия, 1970.
3. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики. М.: Энергия, 1989.
4. Мостяев В. А., Дюжиков В. И. Технология пьезо- и акустоэлектронных устройств. М.: Ягуар, 1993.