

УДК 621.372.412:621.373.017.71

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

П. Г. ПОЗДНЯКОВ, И. М. ФЕДОТОВ

**ТЕПЛОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ
КОЛЕБЛЮЩИХСЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛАСТИН**

(Представлено академиком И. В. Беловым 30 XII 1971)

Большинство экспериментальных и теоретических исследований температурной зависимости частоты собственных колебаний пьезокварцевых пластин выполнено в предположении отсутствия в них температурных градиентов. Однако при изменении внешней температуры возникновение градиентов неизбежно. Влияние таких нестационарных градиентов, возникающих в результате изменений внешней температуры и являющихся функцией скорости ее изменения, впервые подробно исследовано А. Н. Дикиджи и Л. Е. Ивлевым (1, 2). Ими введено понятие температурно-динамического коэффициента частоты и изучен механизм влияния градиентов на частоту для случая пластин, совершающих толщинно-сдвиговые колебания. Однако количество работ, касающихся влияния нестационарных температурных градиентов на частоту, невелико.

Развитие микроэлектроники привело к созданию интегральных пьезоэлектрических устройств, например, резонаторов с пленочными нагревателями, нанесенными на поверхность пьезоэлемента, и кварцевых генераторов, все или большинство элементов которых расположены на кварцевой пластине (3, 4, 6). Такие устройства имеют локальные источники тепла, расположенные вблизи или на самом пьезоэлементе и создающие в них температурные градиенты, которые в известных условиях можно рассматривать как стационарные. Исследования влияния таких градиентов, насколько нам известно, не производились. Проектирование же указанных выше устройств без учета влияний возникающих в них градиентов, очевидно, существенно затрудняется.

Экспериментальные исследования резонаторов с пленочными нагревателями позволили установить существенное влияние режима постоянного перегулируемого нагрева на зависимость частоты от температуры. Обнаружено существенное уменьшение зависимости частоты от температуры при подогреве пьезоэлементов от источника постоянного по величине напряжения.

На рис. 1 изображен пьезоэлемент, имеющий форму длинного стержня с разделенным электродным покрытием, выполняющим роль нагревателя. Источник напряжения, подогрева присоединен к двум проволочным отводам, припаянным к покрытию. Пьезоэлемент совершает крутильные колебания (3) на частоте около 27 кГц. Разделением электродного покрытия достигалась по возможности более равномерная плотность тока.

На рис. 2 изображены кривые зависимости частоты от внешней температуры резонатора для случаев выключенного и включенного источника

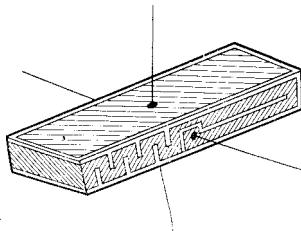


Рис. 1. Внешний вид пьезоэлемента, совершающего крутильные колебания, с разделенным электродным покрытием

питания нагревателя, свидетельствующие о существенном влиянии режима нагрева пьезоэлемента на частотно-температурную характеристику (ч.т.х.) резонатора. При нагретом пьезоэлементе происходит не только существенное смещение вершины ч.т.х. в область более низкой температуры, но и уменьшение ее крутизны. На рис. 2, а, б приведены ч.т.х. резонатора с пьезоэлементом, совершающим колебания сдвига на частоте около 400 кгц и имеющим исходную ч.т.х. в виде кривой третьего порядка с пологим участком в области высокой температуры. При подогреве пьезоэлемента пологий участок ч.т.х. существенно удлиняется и распространяется на область низкой температуры. Практическое значение резонаторов с пленочными на-

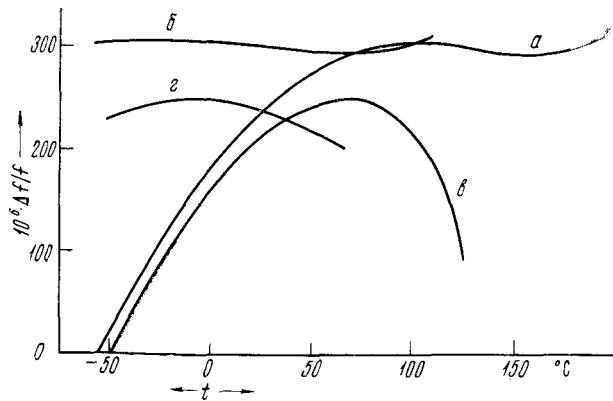


Рис. 2. Зависимости частоты резонаторов от температуры. Источник питания нагревателя резонатора крутильных колебаний: а — выключен, б — включен. Источник питания резонатора сдвиговых колебаний: в — выключен, г — включен

гревателями очевидно, так как уже использование подогрева от источника постоянного напряжения позволяет более чем на порядок повысить стабильность частоты резонаторов.

Для выяснения механизма влияния температурных градиентов получены зависимости частоты от напряжения источника питания для трех разных положений локального нагревателя. В качестве объекта исследований использован пьезоэлемент крутильных колебаний, характеристики которого аналогичны приведенным на рис. 1. Локальный нагреватель располагался на конце, в середине пьезоэлемента и в промежуточном между первыми двумя положениями (рис. 3а, 1—3). На рис. 3б приведены зависимости частоты от напряжения источника питания нагревателя. Из рассмотрения этих кривых видно, что нагрев конца стержня вызывает противоположное по знаку, но примерно равное по величине изменение частоты по сравнению со случаем, когда нагреву подвергается середина стержня. Для третьего, промежуточного положения нагревателя изменение мощности нагрева вызывает лишь незначительное изменение частоты. Такой характер зависимости в последнем случае можно было ожидать, зная зависимости в первых двух случаях.

Участок локального нагрева в рассматриваемом примере существенно меньше длины упругой волны, и механизм влияния такого нагрева на частоту можно объяснить, исходя из закономерностей распределения упругих напряжений и механических смещений и учитывая вклад, вносимый инерционными, упругими и геометрическими характеристиками рассматриваемого участка стержня в значения эквивалентных механических параметров — эквивалентных масс и жесткости. На рис. 3 изображены эпюры динамических напряжений и смещений вдоль длины стержня, из которых видно, что наибольшие напряжения имеют место в середине стержня, а

наибольшие смещения совершают его конечные участки. Соответственно частота собственных колебаний в большой мере определяется упругими свойствами средней части стержня и инерционными — его конечных участков. Влияние же упругих свойств конечных участков и инерции средней части стержня на частоту незначительно.

Температурный коэффициент частоты (т.к.ч.) стержня можно представить в виде суммы компонент, представляющих температурные коэффициенты соответствующих эквивалентных механических параметров и линейных размеров, определяющих частоту. Малый т.к.ч. обусловлен взаимной компенсацией этих компонент. Исходя из этих представлений, можно попытаться,

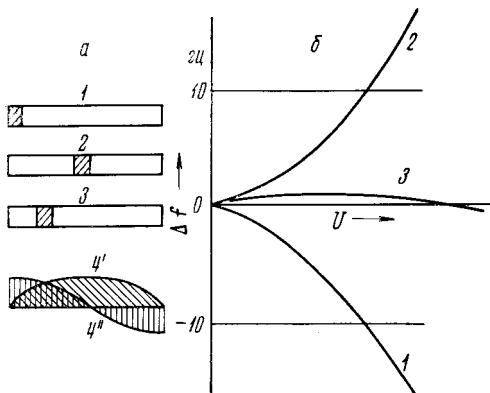


Рис. 3

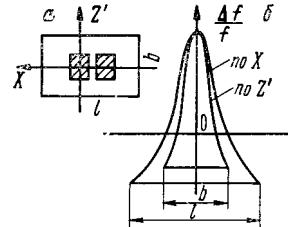


Рис. 4

Рис. 3. a — к исследованиям резонаторов с кручильными колебаниями. 1, 2, 3 — случаи расположения локального нагревателя на пьезоэлементе, 4 — эпюра упругих напряжений и механических смещений. б — зависимость резонансной частоты пьезоэлемента, совершающего кручильные колебания, от напряжения источника питания нагревателя при расположениях локального нагревателя, соответствующих а.

Рис. 4. Термовое зондирование прямоугольной кварцевой пластины АТ-среза при возбуждении колебаний сдвига по толщине. а — внешний вид исследуемого пьезоэлемента, б — тепловые зондовые характеристики

что локальный нагрев средней части стержня повлечет заметное изменение действующей (эквивалентной) жесткости стержня и лишь незначительное изменение его эквивалентной массы. При нагреве конечных участков, наоборот, существенно изменяется эквивалентная масса и незначительно — эквивалентная жесткость. Поскольку малый т.к.ч. обычно определяется компенсацией т.к. упругой и инерционной компонент и последние, следовательно, имеют различные знаки, нетрудно сделать вывод, что нагрев конечных участков стержня должен сопровождаться противоположным по знаку изменением частоты по сравнению со случаем, когда нагревается его средняя часть.

В случае толщинных колебаний пластин локальный нагрев участка поверхности вызывает лишь незначительные градиенты по толщине, влиянием которых можно пренебречь. Участок локального нагрева в этом случае оказывается больше длины волн упругого колебания, а градиентами в направлении распространения упругих волн, как указывалось, можно пренебречь. Механизм влияния локального нагрева для толщинных колебаний, очевидно, иной. Для выяснения влияния температурных градиентов в таких случаях представляется целесообразным получение полной топологической картины изменений частоты при тепловом (температурном) зондировании поверхности колеблющейся кристаллической пластины. Авторами было осуществлено такое тепловое зондирование кварцевых стержней и пластин различных срезов, совершающих различные виды колебаний. В качестве зонда использовался V-образный проволочный нагреватель, через который пропускался электрический ток, нагревающий его ко-

нец до температуры 200—300° С. Конец этого нагревателя подводился близко к поверхности кварцевой пластины, включенной в колебательную цепь. Помощью суппорта с микрометрическим движением в двух взаимно перпендикулярных направлениях конец зонда мог последовательно перемещаться относительно пластины с фиксацией положения относительно любой точки ее поверхности. Зондовые характеристики снимались для ряда точек, в которых зонд останавливался на время, необходимое для установления частоты и ее измерения. Температура нагрева пластины, зависящая от температуры зонда, расстояния между последним и пластиной и других факторов оставалась неизвестной и непосредственно не измерялась. Считалось, что нагрев пластины зондом в различных ее точках приблизительно одинаков. При этом существенно важно получить только топологическую картину относительных изменений частоты. Представляется более удобным осуществлять тепловое зондирование колеблющихся пьезоэлектрических пластин непосредственным воздействием направленного излучения, например, сфокусированными лучами светового спектра или слабым лазерным лучом.

На рис. 4 изображены характеристики теплового зондирования, полученные для прямоугольных кварцевых пластин АТ-реза, совершающих сдвиговые колебания по толщине. Характеристики сняты посредством описанного выше проволочного зонда, причем зондирование производилось вдоль линий, параллельных направлениям осей X и Z' , как показано на рис. 4а. Для полученных зависимостей характерно то, что нагрев участков, близких к краям пластины, вызывает изменения частоты противоположного знака по сравнению с изменениями, обусловленными нагревом средней части пластины. Имеется область, для которой локальный нагрев не вызывает изменений частоты.

Тепловое зондирование колеблющихся кристаллических пластин, по-видимому, окажется полезным и простым экспериментальным методом, позволяющим достаточно рационально решать топологические задачи размещения элементов интегрального кварцевого генератора на поверхности пьезоэлектрической пластины, выполняющей роль подложки генератора.

Поступило
20 XII 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. Е. Ивлев, Электронная техника, сер. IX, в. 4, 20 (1967). ² Л. Е. Ивлев, А. Н. Дикиджи, Электронная техника, сер. IX, в. 4, 12 (1968). ³ П. Г. Поздняков, Э. Г. Маркосян, Авт. свид. № 166745, 1963; Бюлл. изобр., № 23 (1964). ⁴ П. Г. Поздняков, С. В. Рахманинов, Ю. С. Снопов, Авт. свид. № 154889, 1960; Бюлл. изобр., № 12 (1963). ⁵ П. Г. Поздняков, Кристаллография, 15, в. 1, 76 (1970). ⁶ П. Г. Поздняков, И. М. Федотов, В. И. Бирюков, Электронная техника, сер. IX, в. 4, 27 (1971).