

Research on Quartz Crystal Characteristics and Application Problems

Meng Tong, Wenjie Tian, Fubin Chen

Sensors Key Laboratory, Beijing University of Information Science and Technology, Beijing
Email: tm.ting@qq.com

Received: Apr. 8th, 2018; accepted: Apr. 21st, 2018; published: Apr. 28th, 2018

Abstract

Sensors are generally composed of sensitive components, conversion structures and other auxiliary components. Sensitive components are made using the inherent characteristics of developed materials or developed secondary characteristics, which are then finely processed to form the core of the sensor. Quartz crystal has significant anisotropic piezoelectric properties and is an important material for sensor-sensitive components. In this paper, by consulting a large amount of data and literature, the related characteristics of quartz crystal are studied and analyzed. Aiming at the related characteristics, application fields and existing problems of quartz crystal, the corresponding solutions are put forward, which provide a reference for the development and application of quartz crystal properties.

Keywords

Quartz Crystal, Sensor, Characteristic Research, Application Areas

石英晶体特性及应用存在的问题研究

佟 盟, 田文杰, 陈福彬

北京信息科技大学传感器重点实验室, 北京
Email: tm.ting@qq.com

收稿日期: 2018年4月8日; 录用日期: 2018年4月21日; 发布日期: 2018年4月28日

摘 要

传感器一般都由敏感元件、转换结构和其他辅助部件组成, 敏感元件是利用某种材料的固有特性或开发的二次特性, 再经精细加工而制成, 是传感器的核心。石英晶体具有显著的各向异性压电特性, 是传感

器敏感元件的一种重要材料。本文通过查阅大量资料和文献,对石英晶体相关特性进行了研究分析。针对石英晶体的相关特性、应用领域及其存在的问题,提出相应的解决思路,为石英晶体特性的开发应用提供了参考。

关键词

石英晶体, 传感器, 特性研究, 应用领域

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

传感技术是现代科技发展的基础,是信息获取的关键。传感技术主要体现在对传感器的敏感元件敏感机理、信息转换及可靠性技术等领域的综合研究方面。而敏感元件作为传感器的中枢神经,是传感技术研究工作的核心领域,是利用材料的固有特性或开发的二次特性,再经精细加工而成。材料是否具有某种特性是传感器开发应用的关键。没有好的材料就不可能有好的传感器。新材料的出现不断推动传感器的向前发展。同一种材料可能具有多种特性,对多种信息具有敏感性,同时多种材料也可能具有相同的某种特性。因此,传感器所涉及的材料问题十分错综复杂[1]。例如,石英晶体,除具有典型的压电效应外,同时具有光学、温度及各向异性等特性,所以,用石英晶体可开发出不同类型的传感器。天然石英晶体从含有溶解 SiO_2 的水溶液生成,大多数情况下,这些晶体生长在岩洞中或沉积在河床中。由于天然的石英晶体生长于自然环境,纯度低,产量少,且成本高,开发应用受到限制。目前人工培育高纯度石英晶体的技术已日益成熟,因此,相关领域的研究受到人们的重视。作为一种重要的压电材料,石英晶体有着重要而广泛的应用领域。本文对石英晶体材料的发展、石英晶体的特性研究状况、应用领域、以及存在的问题和发展方向进行了分析研究,并提出相应的解决思路。

2. 石英晶体的发展状况

我国对人造石英晶体的研制始于二十世纪六十年代初期,到 1978 年,国内用于制造电子元器件的天然石英几乎被人造石英所替代。经过从“六五”到“九五”的国家攻关,在传感器研究开发、设计、制造、可靠性改进等方面获得长足的进步,初步形成了传感器研究、开发、生产和应用的体系[2]。尤其是在“八五”、“九五”期间,石英晶体材料和器件方面都经历了一次质的发展过程。随着我国科学技术的高速发展及人均生活水平的提高,以石英晶体为材料的元器件及智能化产品越来越受到人们的重视并逐渐应用于各个领域。据不完全统计,目前从事石英晶体相关技术的企业约 170 多家,在生产数量方面,我国已成为石英晶体材料和元器件的生产大国和主要出口国。但在石英晶体高端技术和质量方面,与发达国家相比还存在一定的差距。基于优良的特性和低成本的优势,在未来较长的时期内是其他元器件所难以替代的。我国石英晶体谐振器行业成长迅速,各类产品市场规模逐年递增。

国外人造石英晶体方面的研究开发主要集中于欧美发达国家。在 20 世纪 50 年代初,美国人首先通过水热法研制成功人造石英晶体,并于 1960 年建立了第一座人造石英晶体工厂。二十世纪八十年代,日本超过美国成为全球最大的人造石英晶体生产制造国。在日本,石英晶体谐振器被称为“工业之盐”,他们的企业占据全球石英晶体市场的 60%。如表 1 所示[3],列出了国外主要生产石英谐振器的厂家。此

Table 1. Foreign quartz resonator major manufacturers
表 1. 国外石英谐振器主要生产厂家的

厂商	国家
爱普生拓优科梦 Epson Toyocom	日本
电波 NDK	日本
大真空 KDS	日本
Kyocera Kinseki	日本
Vectron	美国
Rakon	新西兰

后, 石英晶体材料在国外得到了迅速的发展, 并用于各种电子元器件, 进而创新开发出各种传感器, 促进了经济的发展。目前, 全球石英晶体元器件都将朝着多元化、小型化、片式化、集成化的趋势迅速发展。

我国现有生产产品多为中低档产品, 产品单一, 企业数量多, 规模小, 技术水平比较落后, 资金短缺, 后续投入不足, 在产品产量、质量、品种、经营管理和生产效率等方面与世界先进水平差距较大[4]。

3. 石英晶体的特性

3.1. 石英晶体的压电特性

压电效应, 就是力与电之间的关系。当石英晶体表面沿某一方向受到应力时, 表面会发生变形, 同时其内部会产生极化现象, 此时石英晶体两个表面会产生符号相反的电荷, 当外应力去掉时, 又恢复到不带电的状态, 这种现象就是压电效应, 并于 1880 年被雅克·居里(Jacques Curie)和皮埃尔·居里(Pierre Curie)发现。他们不仅证明了这一现象, 而且确立了它在某一已知晶体中是否存在的判断标准[5]。1894 年, 福克特(W. Voigt)更加严谨地定义出晶体结构与压电性的关系, 并发现了 32 种晶类具有压电效应。压电效应又分为“正压电效应”和“逆压电效应”。简单地说, 上述描述中机械能转换成电能的现象称为“正压电效应”; 反之, 电能转换成机械能的现象称为“逆压电效应”。可用图 1 [6]简单描述这种关系:

由石英晶体的压电效应, 晶体的机械振动会产生交变电场, 但一般情况下, 晶体的机械振幅和交变电场的振幅都很小。当外加电场的频率为某一特定值时, 晶体机械振动的振幅会突然加大很多倍。这一特定频率称为石英晶体的谐振频率, 此即石英晶体的压电谐振现象。

石英晶体的压电谐振现象可以用等效电路来模拟, 如图 2 所示。其中 C_0 为切片与金属板构成的静电电容, L 和 C 分别是模拟晶体的质量(代表惯性)和弹性, 而当晶片振动时, 因摩擦造成的损耗则用电阻 R 来等效。由于晶片的等效电感 L 很大, 而 C 和 R 很小, 因此 Q 很大, 可以达到 10^6 的量级。

3.2. 石英晶体的力-频特性

1947 年, Bottom 最先发现石英谐振器具有力-频效应。在随后的 50 多年中, 人们通过大量的实验和理论研究, 验证了当石英晶体谐振器振子受力时, 谐振器的频率会随力的变化呈线性关系变化。人们将这一现象, 应用于压力传感器、加速度传感器和力传感器的开发设计上。而这些传感器的作用原理都是将被测量转换为石英晶体的应变, 使石英谐振器产生频率偏差, 通过测量频率偏差的量进而确定被测量。1966 年 Rarajski 列出了那些对由于外力作用而产生频漂有影响的参数, 并对它们进行了定义[7]。在这些所有参数中影响最大的是: 加力方向角 ψ 、晶体切型角 θ 。简单介绍如下:



Figure 1. The reversibility of the piezoelectric effect

图 1. 压电效应的可逆性

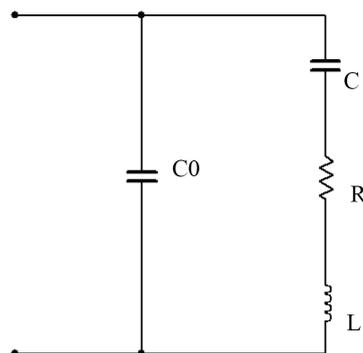


Figure 2. Equivalent circuit

图 2. 等效电路

3.2.1. 力方向角对力-频特性的影响

加力方向与谐振器 X 轴之间的夹角即为加力方位角。Ballato 和 Bechmann [8]对厚度剪切振动的 AT 切石英晶体谐振器频率变化与方位角的关系进行了测试, 结果如图 3 [9]所示:

由图 3 可发现, 当力沿 x 轴方向施加时, 频率变化最大; 而当方位角为 60° 和 120° 时, 频率变化为零。即力沿 x 轴方向作用时, 谐振器的力频转换系数最大。所以, 利用石英谐振器的力频特性来设计制作压力或者加速度传感器时, 通常选择加力方向在石英晶体的 x 轴方向。而将石英谐振器用作频率稳定元件时, 对晶片的固定则选择 60° 和 120° 的方向作为装配方向[10]。

3.2.2. 晶体切型角对力-频特性的影响

石英谐振器的力-频效应与切型角和方位角有关。晶体的旋转角 θ 和 ϕ 分别为晶体绕 x 轴旋转(一次旋转)和绕 Z 轴旋转(二次旋转)的角度, Ballato 和 Bechmann [8]对单旋转谐振器不同方位角 ψ 的压力-频率效应与切型角 θ 的函数关系如图 4 所示[11], 从图中可看出, 切型角 θ 在 $0^\circ \sim 80^\circ$ 之间, 当加力方位角为 60° 和 90° 时, 频率变化明显。因此, 可在此切型角范围内, 在一定的加力方位角作用下, 将不同位置的谐振器的谐振频率进行差频处理得到具有较好力敏特性的差频信号。1967 年, Robert W. Kwyes 等人根据 Ballato 和 Bechmann 的结果以及 Ratajski 的定义, 利用三次弹性常数在假设晶片为各向同性的条件下, 计算出在施力角度为 0° 和 90° 时力灵敏度与旋转角的函数关系[12], 如图 5 所示[11], A、B 为计算结果, C、D 为 Ballato 等的实验结果, 可以看出由于晶片的各向异性以及振荡模式并非完全为厚度切变型(尤其在 $\theta = 90^\circ$ 时处于一种混合振荡模式中)存在一定的误差[13]。

3.3. 石英晶体的温 - 频特性

当石英晶体产生谐振时, 它的谐振频率和温度之间存在明确的函数关系。石英晶体本身具有各向异性的特点, 不同切向会使石英晶体具有不同的性质。石英晶体当温度变化时, 晶体的晶格发生变形, 从而使谐振频率发生改变, 不同切型的石英晶体的频率-温度特性各不相同。图 6 所示为一些常用切型的频率 - 温度特性曲线。

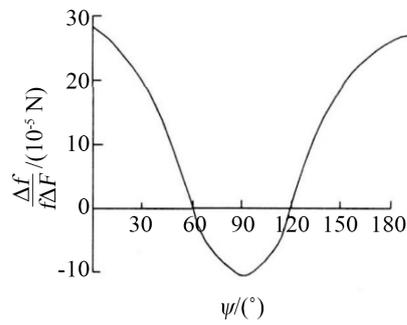


Figure 3. Relationship between force-frequency effect and azimuth angle of AT-cut quartz resonator

图 3. AT-切石英谐振器力-频效应与方位角的关系

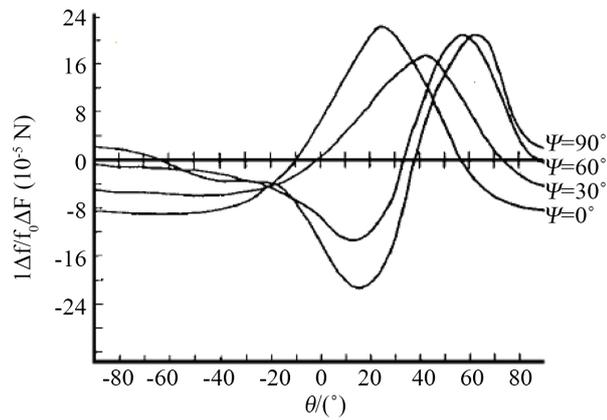


Figure 4. Relationship between force-frequency effect and cut angle and azimuth angle of quartz resonator

图 4. 石英谐振器力-频效应与切型角和方位角的关系

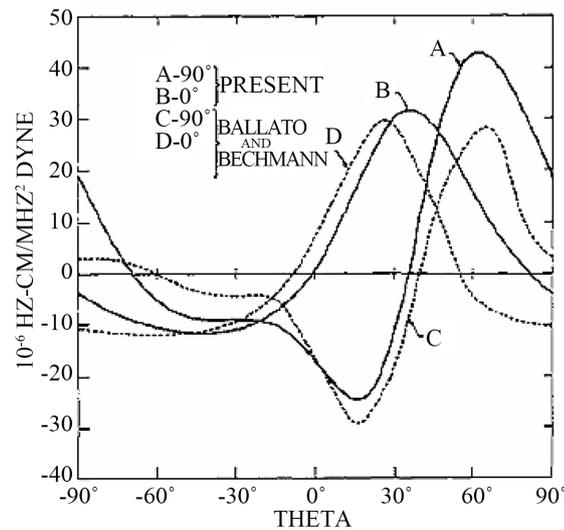


Figure 5. The relationship between the force-frequency effect and the rotation angle of the AT-cut crystal when the force is applied at 0° and 90°

图 5. AT 切晶体在施力角度为 0° 和 90° 时力频效应与旋转角的关系

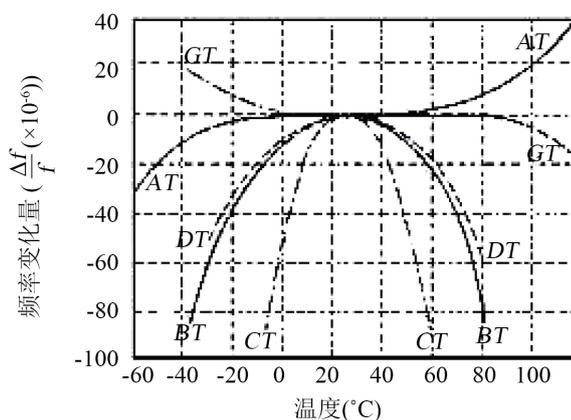


Figure 6. Typical frequency-temperature curves of common cuts

图 6. 常用切型的典型频率-温度曲线

由图 6 可看出, BT、CT、DT 切型的频率温度特性曲线为抛物线, 以室温 25°C 为中心点的一个温度范围内频率变化量较大, 可以利用这个特点在一定温度范围内对频率进行测量, 但不足之处在于, 温度跨度不大, 无法测量较大范围内的频率; AT、GT 切型为三次曲线, 在相同温度变化范围内, 二者频率变化都很稳定, 但由于 GT 切型石英晶体体积大、加工困难不易操作, 所以相比较而言, 目前 AT 切型石英晶体被人们广泛所应用。根据频率方程、密度、晶片尺寸(如长、宽、厚)和弹性常数等随温度的变化规律, 可以得到频率-温度特性方程的一般表达式为:

$$f = f_0 \left[1 + a_0 (T - T_0) + b_0 (T - T_0)^2 + c_0 (T - T_0)^3 + \dots \right]$$

或

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f - f_0}{f_0} = a_0 (T - T_0) + b_0 (T - T_0)^2 + c_0 (T - T_0)^3 + \dots$$

式中, T 为任一温度; T_0 为参考温度; f_0 表示参考温度 T_0 为时的谐振频率; a_0 、 b_0 、 c_0 分别表示参考温度 T_0 时的一级、二级、三级频率温度系数[14]。

4. 石英晶体的应用领域

石英晶体是目前压电材料中应用最广泛的材料之一, 广泛应用于计算机、通信、家用电器、医用电子设备、汽车电子、运动载体及装备监测控制等领域。根据上述石英晶体特性, 下面简要介绍石英晶体主要应用领域及相关典型器件。

4.1. 微质量检测领域

石英晶体的谐振频率与晶体的结构尺寸、晶体的等效密度及刚度系数有关。对于结构尺寸一定的石英晶体, 利用环境因素对晶体等效密度的影响可将石英晶体应用于微弱量的质量检测领域。例如, 石英晶体微天平(QCM)。QCM 是一种以石英晶体为换能元件的压电装置, 利用石英晶体的压电效应, 将待测物质的质量信号转换成频率信号输出, 测量精度可以达到纳克量级。根据检测物质的不同, QCM 可用于气相、液相等研究领域。石英晶体微天平在测量要求较高的研究及工程领域有独特的优势, 有良好的应用前景[15] [16]。

利用石英晶体微天平的高质量敏感性及结构简单、成本低、灵敏度高等特点, 可进一步开发出化

学、生物、医学等传感器。在压电晶体生物传感器中，应用最广泛的一类是基于抗体对抗原的特异性识别和结合功能的免疫传感器，利用抗体与抗原空间构象的互补性，实现其对形状或分子结构的特异选择性识别[17]。在石英晶体微天平化学传感器中，又可分为湿敏传感器、气敏传感器、水中重金属离子传感器等。利用其稳定性好、灵敏度高、响应速度快、等优点，可以测量水中湿度、对大气中所含的各种不同气体进行检测和监控以及检测水中重金属离子[18]。

典型的 QCM 仪器如美国 AMETEK 公司(原 EG & G 公司)生产的 QCA 系列，可进行气体、液体环境下的微质量检测，实时检测由于样品吸附在石英金电极表面而引起的频率降[19]。A. Fort 等[20]用 PEDOT 修饰膜片来检测 NO₂，在 35℃ 下，灵敏度能达到 2.6 Hz/10⁻⁶。Bekir Mumykmaz 等[21]研发了一种无需温湿传感器而对温湿进行补偿的系统，从而减少温湿度对 QCM 的影响。Sung-Rok Hong 等[22]，利用 QCM 快速诊断 VHSV 病毒，其精度达 0.0016 μmol/L。A.Cao-Paz 等[23]利用 QCM 测量铅酸蓄电池电解液的密度和粘度，能够实时知道电池放电的电荷状态。

4.2. 力检测领域

石英谐振器受力(或应力)作用时，振动频率随石英晶体谐振器的这种力频敏感效应，可将石英晶体应用于力检测领域。如应用于石英力、压力传感器，以及姿态传感器、加速度计、陀螺仪等惯性元件及监测控制系统。石英晶体的振动模式有多种：如长度伸缩、面切变、厚度切变等。长度伸缩振动模式下，长度、宽度伸缩振动的振动频率范围一般在中低频，而厚度伸缩振动的振动频率范围一般在高频；面切变振动模式下，CT 切型的振动频率范围一般在 400~500 KHz，DT 切型的振动频率范围一般在 130~600 KHz；厚度切变振动模式下，AT 切型的振动频率范围一般在 800 K~350 MHz，BT 切型的振动频率范围一般在 3~75 MHz。其中厚度切变模式是石英谐振式压力传感器应用的主要振动模式。如常见的石英晶体谐振式压力传感器是利用石英晶体的纵向和横向压电效应制成的厚度切变动态压力传感器。如图 7 [24] 所示，为厚度切变振动模式示意图。

石英谐振式压力传感器广泛应用于各个领域。在航天领域，用于测量液体火箭推进装置的燃烧室压力，进而知道推进装置燃烧是否稳定；在工业实践上，也可用于增压缸、压力机、空调制冷设备等众多领域。

在姿态及惯性监测控制方面，石英水平姿态传感器在国防科技以及自动化控制中被广泛应用，这种传感器多采取摆式类型，一般有固体摆式、液体摆式，而利用石英谐振器力频特性研制的姿态传感器，国外仅有日本报道了精度为 0.12° 的民用产品[25] [26]。石英加速度传感器是通过石英谐振器的正逆压电效应形成的应变敏感特性，使被测力改变石英谐振器的应力状态，从而调制谐振频率，通过测量谐振频率的变化量来实现对加速度的测量[27]。石英加速度传感器主要用于航空航天、消费电子、工业、交通、检测、导航等惯导系统中。在惯导系统中所采用的形式主要有摆式积分陀螺加速度计、力平衡式加速度计、振弦加速度计、振梁加速度计和单晶硅微加工加速度计。石英角速度传感器(陀螺仪)是一种测量转动角速率和角加速度的惯性元件，广泛应用于航空、军事以及汽车等领域，当前，陀螺仪主要有机械、压电和光学式的[28] [29] [30] [31]，如图 8 所示是一种振梁式振动陀螺仪，这种陀螺仪是利用压电材料的正、逆压电效应来产生陀螺效应，主要应用在精度不高的测量领域[32]。表 2 列举出陀螺仪的精度。

4.3. 温度检测领域

利用温度对石英晶体结构参数的影响而形成的温度-频率特性，可将石英晶体应用于温度检测领域。由于石英晶体本身具有各向异性的特点，切型会影响石英晶体本身的性质，使晶体温度-频率特性随切型不同出现差异。所以采用特殊的切割方向，可使频率随温度变化的特性加强。

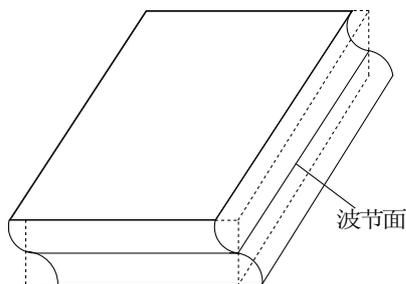


Figure 7. Schematic diagram of thickness shear vibration

图 7. 厚度切变振动模式示意图

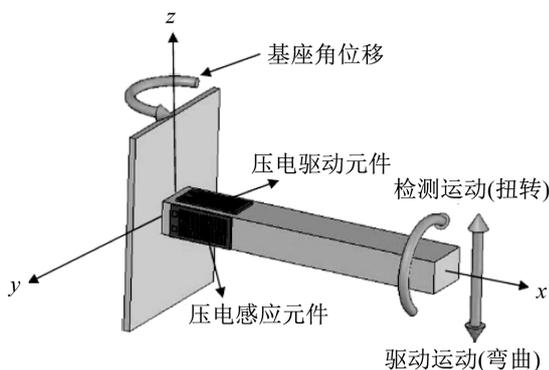


Figure 8. Vibration beam vibration gyroscope diagram

图 8. 振梁式振动陀螺仪简图

Table 2. Gyro accuracy

表 2. 陀螺仪精度

性能级别	零偏稳定性
消费级	>100°/h
速率级	>10°/h
战术级	<10°/h
惯性级	<0.1°/h

在温度检测领域，基于半导体技术的温度传感器(如半导体点温计)具有与微电子技术兼容的特点，但其受材料加工工艺影响而体现出不同的检测灵敏度，在用于温度测量时需要进行不断的校验，且敏感探头间互换性较差，总体测温精度不高[33] [34]。相较而言，基于石英晶体温度-频率特性的温度传感器具有对温度感知能力强、分辨率高、频率响应快等优点。如谐振式石英温度传感器，利用石英晶体谐振子作温度敏感元件进行温度测量，结构如图 9 所示。环境温度变化时，作为温度敏感元件的谐振子的谐振频率发生改变，从而导致温度传感器的输出频率产生变化，检测频率变化量便可知晓温度的变化大小。根据不同的频率和切型，石英晶体温度传感器的温度灵敏度可以在 20 Hz/°C~2850 Hz/°C 范围内变动，这可以使温度分辨力达到 $1 \times 10^{-4} \text{°C}$ [35]。石英晶体温度传感器可应用于各个领域，大到航空航天小到人们的日常生活(如家用的数字温度计)。国外对于石英晶体温度传感器的研究技术已相当成熟，而我国对于这类传感器的研究相对较晚，加上国外技术封锁和国内加工工艺的限制，使得国内石英晶体传感器的研究发展相对落后[36]。

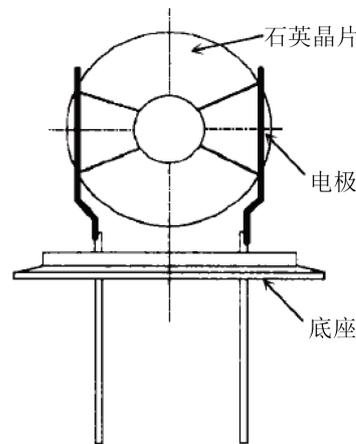


Figure 9. Structure of a quartz crystal temperature sensor

图 9. 石英晶体温度传感器敏感元件结构

5. 石英晶体在应用中存在的问题及思考

国内对石英晶体进行研究至今已有半个多世纪，并取得了令人瞩目的成果。但石英晶体作为不同的敏感元件应用于不同的领域仍然存在着不同的问题。

例如，在力检测领域，无论是多么好的石英晶体谐振式压力传感器，也不能把绝缘阻抗做得无穷大，所以不适合长时间地使用在静态压力测量中。在温度检测方面，温度系数对传感器的影响很大，对于谐振式石英温度传感器，若频率温度系数低，则对应的温度传感器的灵敏度就低。因此，在选择作为温度敏感元件的晶体时，应根据温度与切型的关系及检测温度的范围，选择温度系数较大即温度-频率特性较显著的晶体切型。一般情况下，检测灵敏度与检测范围(量程)是相互制约的，二者如何搭配应根据实际需要作相应调整，以达到最佳检测效果为宜。在微质量检测方面，石英晶体传感器在液相中的灵敏度低于在气相中的灵敏度。在液相中有许多影响灵敏度的因素(如溶液中的粘度、密度、PH值等)存在，如何消除和减少这些干扰因素的影响，是一个需要深入研究的问题。

压电石英晶体传感器一般是以频率或者电压、电流等物理量的形式输出，通过这些物理量的变化与待测量之间的关系，来获取待测量的信息。能否从多种角度，根据待测量与相关参数(如频率、表观尺寸、材料参数)的关系，并借助相应的测试手段，得到待测量的完整信息，并将信息进行融合处理，从而实现对待测量的精确测量，这或许是未来压电石英传感器的研究及应用探索的方向。

随着现代科技的快速发展及互联网技术的广泛应用，数字输出型传感器必将得到广泛应用和发展。而能直接以数字式输出并能与计算机直接接口的兼具高稳定性的石英晶体传感器，特别是随微加工技术的完善及快速发展而兴起的更加微型化的石英传感器在智能化、微型化领域将更具有广泛的应用前景及潜在竞争力，将成为今后数字式传感技术发展的主流方向。

基金项目

北京市自然科学基金重点项目(KZ201511232037)；北京市教育委员会科技计划基金项目(KM201511232022)；现代控制技术教育部重点实验室(北京信息科技大学)基金项目。

参考文献

- [1] 潘炼. 传感器原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.

- [2] 陆遥. 传感器技术的研究现状与发展前景[J]. 经济师, 2009(9): 273-274.
- [3] 2014 年全球主要石英晶体谐振器生产厂商简介及行业进入壁垒剖析[EB/OL]. <http://www.chyxx.com/industry/201407/265534.html>, 2014-07-17.
- [4] 王永军. 我国石英晶体行业发展深析[J]. 电子产品与技术, 2004(11): 40-43.
- [5] (美)波托姆(Brottom, V.E.), 著. 石英晶体元件设计导论[M]. 潘景程, 译. 北京: 宇航出版社, 1987.
- [6] 周鹏. 基于石英晶体等径向力结构压力传感器研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2013.
- [7] Ratajski, J.M. (1966) The Force Sensitivity of AT-Cut Quartz Crystals. *Proceedings of the 20th Annual Symposium on Frequency Control*, 19-21 April 1966, Fort Monmouth, New Jersey, USA, 33-49. <https://doi.org/10.1109/FREQ.1966.199606>
- [8] Ballot, A.D. and Bechmann, R. (1960) Effect of Initial Stress in Vibrating Quartz Plates. *Proceedings IRE*, **48**, 61-262.
- [9] 罗兵, 田文杰, 邹淑芳. 薄圆片石英晶体应力分布及谐振器力频实验[J]. 微纳电子技术, 2009, 46(8): 489-493.
- [10] 宁永怀, 田文杰, 鄂然, 崔媛媛. 石英谐振器力频特性的 ANSYS 分析及实验对比[J]. 电子元件与材料, 2007, 26(5): 28-30.
- [11] 冯冠平, 王晓红, 王劲松. 石英晶体谐振器的力频效应及应用[J]. 清华大学学报(自然版), 1998, 38(8): 35-38.
- [12] Keyes, R.W. and Blair, F.W. (1967) Stress Dependence of the Frequency of Quartz Plates. *Proceedings of the IEEE*, **55**, 565-566. <https://doi.org/10.1109/PROC.1967.5591>
- [13] 秦姗姗. 基于力频效应的新型温补晶振的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [14] 冯宝英. 基于力频特性的新型温度补偿晶体振荡器研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [15] 王起才, 赵侃, 展宏跃. 新建隧道施工对临近既有隧道结构安全性影响分析[J]. 铁道建筑技术, 2010(3): 83-86.
- [16] 郭健, 展宏跃. 新建隧道施工对既有隧道影响的试验研究[J]. 山西建筑, 2011, 37(13): 163-164.
- [17] 杜滨阳. 石英晶体微天平化学传感器[C]//上海市传感技术学会、江苏省半导体与集成技术学会、浙江省仪器仪表与自动化联合会, 第二届长三角地区传感技术学术交流会论文集. 上海市传感技术学会、江苏省半导体与集成技术学会、浙江省仪器仪表与自动化联合会, 2006: 6.
- [18] 清山哲郎, 董万堂, 译. 化学传感器[M]. 北京: 化学工业出版社, 1990: 14-19.
- [19] 陈柱, 聂立波, 常浩. 石英晶体微天平的研究进展及应用[J]. 分析仪器, 2011(4): 18-22.
- [20] Fort, A., Innocenti, M., Foreste, M.L., et al. (2009) *Adv Sens Interfaces*, (3), 184-187.
- [21] Mumyalmaz, B., Ozmen, A., Ebeoglu, M.A., et al. (2010) A Study on the Development of a Compensation Method for Humidity Effect in QCM Sensor Responses. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **147**, 277-282. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.03.019>
- [22] Hong, S.-R., Jeong, H.-D. and Hong, S. (2010) QCM DNA Biosensor for the Diagnosis of a Fish Pathogenic Virus VHSV. *Talanta*, **82**, 899-903. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.04.065>
- [23] Cao-Paz, A., Rodríguez-Pardo, L. and Fariña, J. (2010) Application of the QCM in Lead Acid Batteries Electrolyte Measurements. *Procedia Engineering*, **5**, 1260-1263.
- [24] 马博. 基于互补抑制及信息融合的多电极石英谐振器力敏特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京信息科技大学, 2017.
- [25] 张福学. 传感器与执行器大全[M]. 北京: 电子工业出版社, 1997.
- [26] 路峻岭, 田文杰, 张伟, 张福学. 压电谐振式水平姿态传感器研究[J]. 电子元件与材料, 2004, 23(8): 24-26.
- [27] 田文杰, 路峻岭, 张伟, 张福学. 数字式压电石英加速度传感器的支撑结构研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2002, 24(4): 274-276.
- [28] Ansari, M., Esmailzadeh, E. and Jalili, N. (2009) Coupled Vibration and Parameter Sensitivity Analysis of Rocking-Mass Vibrating Gyroscopes. *Journal of Sound and Vibration*, **327**, 564-583. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.06.021>
- [29] Bhadbhade, V., Jalili, N. and Nima, M.S. (2008) A Novel Piezoelectrically Actuated Flexural/Torsional Vibrating Beam Gyroscope. *Journal of Sound and Vibration*, **311**, 1305-1324. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.10.017>
- [30] Yang, J.S. and Fang, H.Y. (2003) A New Ceramic Tube Piezoelectric Gyroscope. *Sensors and Actuators A: Physical*, **107**, 42-49. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(03\)00209-7](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(03)00209-7)
- [31] Ryoo, H., Lee, Y. and Roh, Y. (1998) Design and Fabrication of a Dual-Axial Gyroscope with Piezoelectric Ceramics. *Sensors and Actuators A: Physical*, **65**, 54-60. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(97\)01636-1](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(97)01636-1)

-
- [32] 张昌松, 雷春耀. 有限元法在压电振动陀螺仪研究中的应用进展[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(10): 7-11.
- [33] Halski, L., Echersdort, K. and Kucharski, J. (2001) Temperature Measurement. John Wiley & Sons Ltd, Hoboken, 139-149.
- [34] Childs, P.N.R., Greenwood, J. and Long, A. (2007) Review of Temperature Measurement. *Review of Scientific Instruments*, **71**, 2959-2978.
- [35] 陈小林, 王祝盈, 谢中, 翦知渐, 皮承宪. 石英晶体温度传感器的应用[J]. 传感器技术, 2002, 21(5): 55-57.
- [36] 徐军. 石英音叉谐振式温度传感器及关键技术的研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2331-0235, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: jsta@hanspub.org