2017年12月

文章编号:1004-2474(2017)06-0865-04

# 多电极石英力敏谐振器的力敏特性及稳定性研究

马博1,田文杰1,赵庆江2,陈福彬1,雷欧1

(1.北京信息科技科技大学 传感器重点实验室,北京 100101;2. 昆明学院 物理科学与技术系,云南 昆明 650214)

摘 要:在分析石英晶片受力作用时晶片内应力分布的基础上,设计了一种多电极新型石英力敏谐振器及信号处理电路。在室温及大气状态下对设计的力敏谐振器同时进行激励时,各对电极对应的谐振器的力-频特性线性度及频率稳定性良好。将各谐振器的频率互作差频,再作叠加处理后,输出的频率信号的力-频系数达到2 951.8 Hz/N,线性相关度为 0.999 7,频率稳定性可达 10<sup>-10</sup>数量级。

关键词:多电极石英谐振器;力敏特性;频率稳定性

中图分类号:TN389 文献标识码:A

## Researchon Force Sensitivity and Stability of Multi-electrode Quartz Force Sensitive Resonator

MA Bo<sup>1</sup>, TIAN Wenjie<sup>1</sup>, ZHAO Qingjiang<sup>2</sup>, CHEN Fubin<sup>1</sup>, LEI Ou<sup>1</sup>

- (1. Sensor Key Laboratory, Beijing University of Information Science and Technology, Beijing 100101, China;
  - 2. Department of Physics Science and Technology, Kunming University, Kunming 650214, China)

Abstract: A new multi-electrode quartz resonator and signal processing circuit is designed on the basis of analyzing the stress distribution in the wafer when the quartz wafer is subjected to force. When a plurality of resonators are simultaneously excited at room temperature and atmospheric conditions, the resonator's linearity of force-frequency characteristics and frequency stability corresponding to the respective electrodes are excellent. After the interaction frequency difference and superposition processing to the frequency of each resonator, the force-frequency coefficient of the output frequency signal can reach 2 951. 8 Hz/N, the linear correlation is 0. 999 7, and the frequency stability can reach the magnitude of  $10^{-10}$ .

Key words: multi-electrode quartz resonator; force-sensitive characteristics; frequency stability

#### 0 引言

压电式石英谐振器具有输出信号精确度高、数字量输出、抗干扰能力强、输出响应快及稳定性好等优点。石英力敏传感器可用于力、称重、加速度、姿态测量等领域。本文主要根据石英压电效应、石英谐振器力-频敏感机理,在晶片应力仿真分析的基础上,设计了一种集群式多电极力敏谐振器和一种有效的数字信号处理电路,在抑制谐振器干扰因素影响的同时,提高谐振器的力-频敏感特性及频率稳定性,为石英谐振器力敏特性的开发应用提供依据[1]。

1 石英谐振器结构及电路设计

#### 1.1 谐振器晶片内应力分析

石英谐振器的基本结构包括石英晶片、电极、引

线。其核心部件是作为机械振子的石英晶片,电极被蒸镀在石英晶片表面,引线通过导电胶粘连在电极上。电激励信号通过电极加载到晶片表面,在电场作用下,晶片产生机械振动;同时,电信号通过电极传输,当激励信号频率与晶片固有频率相同时,产生谐振<sup>[2]</sup>。圆盘式石英晶体谐振器结构如图 1 所示。

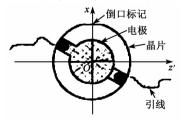


图 1 圆盘式石英晶体谐振器结构示意图 石英谐振器的力敏特性是由石英晶体受力作用

**收稿日期:**2017-03-14

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(4122030);北京市自然科学基金重点资助项目(B类 KZ201511232037);北京市教育委员会科技 计划基金资助项目(KM201511232022);现代控制技术教育部重点实验室(北京信息科技大学)基金资助项目

作者简介:马博(1991-),女,山西大同人,硕士生,主要从事石英晶体特性及应用研究。通信作者:田文杰(1962-),男(回族),云南昭通人, 教授,博士,主要从事石英惯性器件研究及教学工作。E-mail: twjkm2008@163.com。

时晶体内的应力变化而产生的。根据石英晶体的压电效应,以一定切型为基础的石英谐振器的力敏感特性,可用力灵敏度系数  $(K_F)$  和力-频转换系数  $(S_F)$  表示  $(S_F)$  在径向力作用下,石英谐振器的  $K_F$  和  $S_F$  可表示为

$$K_{\rm F} = \frac{\partial f}{f \partial F} \tag{1}$$

$$S_{\rm F} = \frac{\partial f}{\partial F} = K_{\rm F} f \tag{2}$$

本文研究的集成式多电极力敏谐振器,其电极处于同一石英晶体基片的不同位置。晶体受力作用时,对其内部的应力分布进行分析是电极位置设计的基础。

本文采用圆盘式 AT 切石英晶片作为振子元件。在实际传感器转换结构中,石英晶片与结构件接触部位为圆弧,故采用施加弧面力来分析晶片内部的应力分布。

利用仿真软件进行应力分析时,在定义材料性能参数的基础上,采用自由划分形式进行网格单元的划分,如图 2 所示[3-4]。在圆盘的弧面上沿x方向施加 5 N 的对径力时,经计算得到石英晶片内应力分布如图 3 所示。

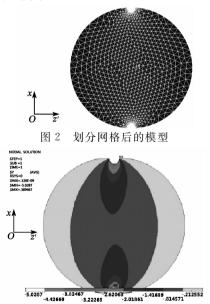


图 3 石英晶体片内应力分布图

在石英晶片上设计多对电极时,在应力变化差异较大的位置设置电极可得到力-频系数差异较大的石英晶体谐振器<sup>[5-6]</sup>。

#### 1.2 谐振器电极设计

对比传统单电极石英谐振器,多电极石英谐振器不仅需要考虑每对电极同时独立工作,还要考虑电极起振问题、电极谐振时产生的寄生振动的消除

问题、电极间的耦合问题、电极与外界耦合、谐振时 非谐波泛音问题等,因而对石英晶片的尺寸、电极尺 寸和位置要求更严格。

综合以上因素,本次实验选用半径 7 mm、厚 0.079 mm、密度为 2 650 kg/m³的 AT 切石英晶片。晶片面经抛光、老化,且边沿作宽为 1 mm 的倒边处理,在 x 轴正向与圆周相交点倒一个垂直于 x 轴的小口,弦长  $2\sim3$  mm。在晶片中心半径为 5 mm的圆上均匀设计 6 对电极,电极直径为Ø1 mm,电极金属引线宽为 0.5 mm,如图 4 所示。

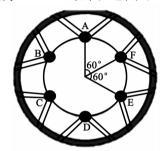


图 4 多电极石英谐振器结构图

#### 1.3 激励及信号处理电路

本文主要借助于 altium designer 软件完成电路设计、PCB 板的绘制。为抑制温度、石英晶体材料等差异带来的干扰,本文对 6 组频率信号采用先差频、再求和、数值显示的处理方法。电路框架如图 5 所示。

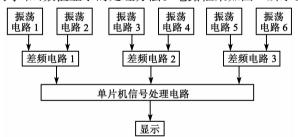


图 5 处理信号电路框图

#### 2 石英谐振器特性测试

#### 2.1 力-频特性

六电极石英谐振器通过振荡电路得到的频率信号分别为  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$ 、 $f_5$ 、 $f_6$ ,用  $f_{ij}$  表示  $f_i$  与  $f_j$  的差频,即  $f_{12} = |f_1 - f_2|$ , $f_{34} = |f_3 - f_4|$ , $f_{56} = |f_5 - f_6|$ 。设  $f = f_{12} + f_{34} + f_{56}$ ,即 6 个频率信号经差频后得到的和。

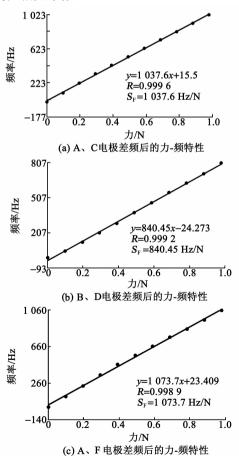
本次试验的 6 对电极位置如图 4 所示。由图可见,在激励电路的作用下,6 对电极对应的谐振器能独立谐振,将 A 电极与 C 电极、B 电极与 D 电极的谐振器谐振频率作差频,再将 A 电极与 F 电极的谐振器谐振频率作差频,得到  $f_{AC}$ 、 $f_{BD}$ 、 $f_{AF}$ ,以及其和  $f=f_{AC}+f_{BD}+f_{AF}$ 。当晶片受径向力作用时,各

差频的频率变化量分别为  $\Delta f_{\rm AC}$ 、 $\Delta f_{\rm BD}$ 、 $\Delta f_{\rm AF}$ 、 $\Delta f$ ,且  $\Delta f = |\Delta f_{\rm AC}| + |\Delta f_{\rm BD}| + |\Delta f_{\rm AF}|$ 。实验测试结果如表 1 所示。

表 1 单基六电极石英谐振器的力-频特性

THE TENTINE AND WHITH				
力/(10 <sup>-2</sup> N)	$\Delta f_{ m AC}/{ m Hz}$	$\Delta f_{ m BD}/{ m Hz}$	$\Delta f_{ m AF}/{ m Hz}$	$\Delta f/\mathrm{Hz}$
0	0	0	0	0
9.8	109	55	115	279
19.6	224	133	231	588
29.4	330	211	352	893
39.2	430	293	468	1 191
49.0	534	384	569	1 487
58.8	631	470	670	1 771
68.6	732	557	766	2 055
78.4	827	637	858	2 322
88.2	923	716	956	2 595
98.0	1 023	807	1 060	2 890

对表 1 中的测试结果进行最小二乘法线性拟合,如图 6 所示。图中,y 为力-频灵敏度特征直线,R 为线性相关系数。



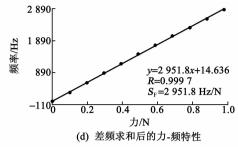


图 6 力-频灵敏度特征拟合直线

由图 6 可见,所取 3 组差频信号的力-频特性的线性度均较好, $S_F$ 最大为 1 073. 7 Hz/N,最小为840. 45 Hz/N。对 3 组差频信号进行求和,最后输出信号的 $S_F$ =2 951. 8 Hz/N,R=0. 999 7。若将 6 对电极对应的谐振器的频率信号分别作差频(可得15 组差频信号)后再求和,将提高最后输出信号的力-频转换系数。

#### 2.2 频率稳定性

石英力敏谐振器作为石英力传感器的核心器件,其稳定性的好坏直接决定了力传感器性能的好坏。用 XHTF 3579 频稳测试仪分别对同一晶片上的各个力敏谐振器进行测量[7-8],每隔 1 s 采集 1 f 数据,每 10 s 计算 1 次频率稳定度,连续测量得到 18 f 个频率稳定度  $\sigma(\tau)$  的值。测试结果如表 2 f 所示。

表 2 6 对电极频率稳定度

电极	$\sigma(\tau)/10^{-10}$
A	3, 446 2, 537 2, 378 3, 857 1, 337 2, 132 4, 094 1, 370 2, 190
	1, 808 2, 531 4, 774 2, 019 6, 162 2, 617 2, 755 3, 530 1, 842
В	4, 498 5, 880 2, 766 4, 562 4, 315 3, 368 4, 148 4, 535 6, 768
ъ	5, 381 3, 970 5, 382 4, 096 2, 551 2, 586 2, 406 4, 328 3, 844
С	9,650 9,391 7,993 3,350 6,240 4,492 4,157 6,609 5,081
	2, 956 3, 365 7, 159 3, 729 8, 825 5, 448 4, 774 9, 251 7, 853
D	7, 351 5, 668 3, 265 2, 696 4, 207 7, 315 5, 340 6, 904 3, 595
	3, 710 4, 157 1, 494 3, 631 3, 389 6, 561 4, 994 2, 971 4, 816
Е	3.823 2.544 3.179 2.851 1.866 3.576 3.476 3.211 2.274
	2, 041 2, 855 2, 877 1, 768 3, 985 2, 693 2, 908 3, 258 2, 370
F	3. 026 3. 305 3. 378 2. 357 2. 195 2. 279 1. 994 2. 881 2. 009
	2, 204 2, 445 1, 596 1, 523 1, 671 2, 042 4, 042 2, 751 2, 898

由表 2 可见,6 对电极对应的力敏谐振器的频率稳定度都处于  $10^{-10}$ 数量级,频率稳定度折线图如图 7 所示。频率稳定度平均值为  $\bar{\sigma}_A$  = 2. 854 ×  $10^{-10}$ ,  $\bar{\sigma}_B$  = 4. 188 ×  $10^{-10}$ ,  $\bar{\sigma}_C$  = 6. 129 ×  $10^{-10}$ ,  $\bar{\sigma}_D$  =

4. 559 ×10<sup>-10</sup>,  $\bar{\sigma}_E = 2.864 \times 10^{-10}$ ,  $\bar{\sigma}_F = 2.478 \times 10^{-10}$ 。引起频率稳定度波动的原因[1]可能是:

- 1) 测试环境的噪声影响。
- 2) 石英谐振器的金属薄膜电极氧化。
- 3) 激励电路的稳定性等。

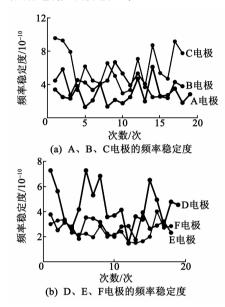


图 7 同一晶片上各谐振器频率稳定性

#### 3 结束语

利用 ANSYS 有限元仿真软件对晶片受径向力作用时晶片内部的应力分布进行仿真分析,在传统石英谐振器的基础上设计了六电极石英力敏谐振器。基于共模抑制原理,设计了谐振器激励电路、频率信号的差频处理电路及求和电路 $^{[5]}$ 。经测试,在电路激励下的 6 对电极对应的谐振器可以独立起振,差频电路对 6 个谐振器两两作差频处理,所得 3 组差频信号有较好的力-频线性特性。3 组差频信号求和后, $S_F=2$  951.8 Hz/N,R=0.999 7。6 个谐振器 频率稳定度可达  $10^{-10}$  数量级,平均值为(2.478~6,129)× $10^{-10}$ 。

### 参考文献:

[1] LOGAN S. 体波石英晶体元件的功率消耗[J]. 今日电子,2010(5);29-30.

LOGAN S. The power consumption of body wave quartz crystal components [J]. Today Electronics,

2010(5):29-30.

- [2] 郑峰. 51 单片机典型应用开发范例大全[M]. 北京:中国铁道出版社,2011.
- [3] 孙荣,周涛.谐振器晶片结构应力的失效分析及减少影响的措施[J].中国高新技术企业,2013(5);80-82.

  SUN Rong, ZHOU Tao. The failure analysis of resonator chip structure stress and the measures to reduce impact[J]. High-tech Enterprises of China, 2013 (5);80-82.
- [4] 张世超,尚建国. 石英晶体谐振器的仿真分析[J]. 西安航空技术高等专科学校学报,2011,29(3):52-54.
  ZHAO Shichao, SHANG Jianguo. The simulation analysis of quartz crystal resonator[J]. Journal of Xi'an Aeronautical Technical College, 2011,29(3):52-54.
- [5] 田文杰,路峻岭,刘玲玲,等. 切变振动型石英晶体谐振器的特点及其应用[J]. 压电与声光,2006,28(2):150-152.

  TIAN Wenjie, LU Junling, LIU Lingling, et al. The characteristics and application of the vibrating quartz crystal resonator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2006,28(2):150-152.
- [6] 吴荣兴,李继亮,于兰珍,等. 石英晶体板高频振动的三维有限元分析[J]. 压电与声光, 2014, 36(5): 821-824.
  WU Rongxing, LI Jiliang, YU Lanzhen, et al. Three-dimensional finite element analysis of high frequency vibration of quartz crystal plate[J]. Piezoelectrics &
- [7] 魏海潮,张记龙,陈友华,等. 弹光调制器压电晶体阻抗 匹配特性的研究[J]. 压电与声光,2013,35(2): 185-187.

Acoustooptics, 2014,36(5):821-824.

- WEI Haichao, ZHANG Jilong, CHEN Youhua, et al. Study on impedance matching characteristics of piezoelectric crystal with light modulator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013,35(2):185-187.
- [8] 宋新菊,李东,王艳林,等. 用于石英晶体-频率测试相位检测技术研究[J]. 传感器世界, 2006(11):14-16. SONG Xinju, LI Dong, WANG Yanlin, et al. Study on phase detection technology for quartz crystal-frequency test[J]. Sensor World, 2006(11):14-16.