**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2951.8 Hz/N,线性相关度为 0.9997,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>

Sensor Key Laboratory, Beijing University of Information Science and Technology, Beijing 100101, China;
 Department of Physics Science and Technology, Kunning University, Kunning 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<sup>[1]</sup>。

- 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<sup>[3]</sup>。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<sup>[3-4]</sup>。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。



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/m<sup>3</sup>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 2~3 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。



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  $\Delta f_{AC} \setminus \Delta f_{BD} \setminus \Delta f_{AF} \setminus \Delta f$ ,且  $\Delta f = |\Delta f_{AC}| + |\Delta f_{BD}| + |\Delta f_{AF}|$ 。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

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<sup>[7-8]</sup>,每隔1s采集1个数据,每10s计算1次频率稳定度,连续测量得到18个频率稳定度 $\sigma(\tau)$ 的值。测试结果如表2所示。

表2 6 对电极频率稳定度

电极	$\sigma( au)/10^{-10}$
۸	3. 446 2. 537 2. 378 3. 857 1. 337 2. 132 4. 094 1. 370 2. 190
A	1.808 2.531 4.774 2.019 6.162 2.617 2.755 3.530 1.84
D	4. 498 5. 880 2. 766 4. 562 4. 315 3. 368 4. 148 4. 535 6. 76
Б	5. 381 3. 970 5. 382 4. 096 2. 551 2. 586 2. 406 4. 328 3. 84
C	9.650 9.391 7.993 3.350 6.240 4.492 4.157 6.609 5.08
C	2. 956 3. 365 7. 159 3. 729 8. 825 5. 448 4. 774 9. 251 7. 85
D	7. 351 5. 668 3. 265 2. 696 4. 207 7. 315 5. 340 6. 904 3. 59
D	3. 710 4. 157 1. 494 3. 631 3. 389 6. 561 4. 994 2. 971 4. 81
F	3. 823 2. 544 3. 179 2. 851 1. 866 3. 576 3. 476 3. 211 2. 274
E	2.041 2.855 2.877 1.768 3.985 2.693 2.908 3.258 2.37
D	3. 026 3. 305 3. 378 2. 357 2. 195 2. 279 1. 994 2. 881 2. 00
Г	2. 204 2. 445 1. 596 1. 523 1. 671 2. 042 4. 042 2. 751 2. 89

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  $\bar{\sigma}_{A} = 2.854 \times 10^{-10}$ , $\bar{\sigma}_{B} = 4.188 \times 10^{-10}$ , $\bar{\sigma}_{C} = 6.129 \times 10^{-10}$ , $\bar{\sigma}_{D} =$ 

4.559 ×10<sup>-10</sup>,  $\bar{\sigma}_{\rm E}$  = 2.864 ×10<sup>-10</sup>,  $\bar{\sigma}_{\rm F}$  = 2.478 ×

- 10<sup>-10</sup>。引起频率稳定度波动的原因<sup>[1]</sup>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<sup>[5]</sup>。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  $(2.478 \sim 6.129) \times 10^{-10}$ 。

#### 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. Threedimensional finite element analysis of high frequency vibration of quartz crystal plate[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014,36(5):821-824.

[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.

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.