

应用于精密振荡器的石英晶体温度特性研究*

朱华兵¹⁾ 吴正斌^{2)†} 刘国强³⁾ 席奎²⁾ 李闪闪²⁾ 董洋洋²⁾

1) (海军工程大学海军兵器新技术应用研究所, 武汉 430033)

2) (中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518055)

3) (广东惠伦晶体科技股份有限公司, 东莞 523757)

(2012年6月11日收到; 2012年8月2日收到修改稿)

采用一种新型压电材料精确表征方法研究了不同环境温度条件下应用于振荡器的石英材料特性变化. 测量了从室温至 100 °C 不同稳定环境温度下 AT 切向石英晶体材料的电子阻抗共振特性, 并采用基于模拟退火优化算法的压电材料精确表征方法对电子阻抗共振特性进行了准确的拟合, 计算出了 AT 切向石英晶体材料在不同温度下包含损耗特性的复数形式材料参数. 通过研究和分析温度变化对石英晶体材料参数及其损耗特性的影响, 为具有稳定温度特性的精密振荡器设计提供了理论和技术支持.

关键词: 石英晶体, 振荡器, 温度特性, 压电材料特性

PACS: 42.70.Ce, 77.65.Fs, 65.40.-b, 77.84.-s

DOI: 10.7498/aps.62.014205

1 引言

在过去的几十年中, 随着包括无线通信等现代电子技术的发展, 振荡器作为主要的频率参考源被广泛地应用于消费类、工业以及军用电子产品和系统中. 石英晶体作为一种压电材料, 由于具有较高的品质因数和稳定的温度特性, 常常被用来设计和制造 200 MHz 频率范围内的振荡器^[1]. 采用石英晶体材料设计和制造的温度补偿晶体振荡器 (temperature compensated crystal oscillators, TCXO) 和恒温晶体振荡器 (oven controlled crystal oscillators, OCXO) 等器件能够产生具有稳定温度特性的高精度参考频率^[2-4]. 精确表征和研究不同温度下石英晶体材料的特性是设计具有稳定温度特性的精密振荡器的基础.

对于诸如石英晶体等压电材料表征方法的研究和探索在不断地发展和完善. IEEE 标准方法忽略了材料的损耗特性, 不能精确地估算诸如石英晶体等高损耗压电材料的参数^[5]. Sherrit 等^[6] 和 Smiths^[7] 提出的理论模型尽管包含了材料的损耗

特性, 但是精度不够理想, 计算结果高于实际测量值. Kwok 等^[8] 提出了一种基于 Gauss-Newton 理论的拟合方法, 能够计算出较精确的压电材料参数, 但是对材料参数初始值的选取比较敏感, 计算结果容易陷入局部极值或产生发散. 本文作者近来提出一种基于模拟退火算法的精确表征方法^[9], 能够克服迭代初始值选取的敏感问题, 并采用该方法对厚度振动模式的高损耗 PZT/聚合物压电复合材料和偏铌酸铅陶瓷材料进行了精确表征.

本文将采用基于模拟退火算法的表征方法, 精确计算在不同温度下石英晶体材料的复材料参数, 通过分析温度变化对石英晶体材料特性的影响, 从而为具有稳定温度特性的精密振荡器设计提供理论和技术支持.

2 理论

频率振荡器产品通常采用具有厚度剪切振动模式的 AT 切向石英晶体材料^[10]. 其复数形式的等应变介电常数 ϵ_{11}^{S*} 、机电耦合系数 k_{15}^* 以及开路弹性常数 c_{55}^{D*} 等参数可以分别用 (1), (2) 和 (3) 式表

* 国家自然科学基金 (批准号: 10804075) 和广东省中国科学院全面战略合作项目 (批准号: 2010B090300004) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zb.wu@siat.ac.cn

示, 其中虚部 ϵ_{11}' , k_{15}' , c_{55}' 分别表示材料参数的损耗特性.

$$\epsilon_{11}^S = \epsilon_{11}^S - i \cdot \epsilon_{11}', \quad (1)$$

$$k_{15}^* = k_{15} + i \cdot k_{15}', \quad (2)$$

$$c_{55}^D = c_{55}^D + i \cdot c_{55}', \quad (3)$$

其复数形式的电子阻抗共振特性可以用 (4) 式表达:

$$Z(f)^* = \frac{t}{i\omega A \epsilon_{11}^S} \left(1 - k_{15}^{*2} \frac{\tan(\omega/4f_p^*)}{\omega/4f_p^*} \right), \quad (4)$$

式中 t 为振子厚度, A 为振子电极面面积, f 和 ω 分别为频率和角频率, f_p^* 为复数形式的电子阻抗反共振频率, 对应阻抗最大时的频率值, 可由 (5) 式计算得到:

$$f_p^* = \sqrt{c_{55}^D/4\rho t^2}, \quad (5)$$

(5) 式中的 ρ 表示石英晶体材料的密度. (4) 式中 $Z(f)^*$ 也可表达为 (6) 式的形式:

$$Z(f)^* = R(f) + i \cdot X(f), \quad (6)$$

$R(f)$ 与 $X(f)$ 分别为 $Z(f)^*$ 的实部和虚部, 表示电阻和电抗.

于是构造模拟退火优化算法的目标函数为

$$\min F(m) = \sum_{i=1}^N [(R(m, f_i) - R(f_i))^2 + (X(m, f_i) - X(f_i))^2], \quad (7)$$

其中 $R(m, f_i)$ 和 $X(m, f_i)$ 分别为包含 ϵ_{11}^{S*} , k_{15}^* , c_{55}^{D*} 等复材料参数自变量组 m 在频率 f_i 的电阻和电抗值, $R(f_i)$ 和 $X(f_i)$ 分别为在频率 f_i 的电阻和电抗实测值, N 为优化计算拟合数据点的个数.

建立起优化算法的目标函数之后, 设定自变量运算区间和目标函数的结果容差, 通过运行模拟退火优化算法程序, 可迭代计算出压电材料参数 [9].

3 样品和实验

本文研究和测试的对象是由北京石晶光电科技股份有限公司生产的 AT 切向石英晶体, 样品的长、宽和厚分别是 11.4, 9.1 和 1.1 mm, 实际测量的密度是 2586 kg/m³. 实验时将石英晶体样品悬空置于恒温箱内, 通过一根 15 cm 长的同轴电缆线和外部的 Agilent HP4294 阻抗分析仪连通并测量其阻抗共振特性. 在实验测量的频率范围内, 同轴电缆线的标称阻抗为 50 Ω . 恒温箱内部温度采用 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 分辨率的数字式热电偶温度计测量. 实验中分别测量了 25 $^{\circ}\text{C}$, 40 $^{\circ}\text{C}$, 60 $^{\circ}\text{C}$, 80 $^{\circ}\text{C}$ 以及 100 $^{\circ}\text{C}$ 等稳定温度下石英晶体的电子阻抗频率特性, 这些温度点也代表了精密振荡器典型的工作温度 [11]. 所有测量开始时, 恒温箱内部温度至少稳定在设定目标温度 ± 1 $^{\circ}\text{C}$ 范围内 2 min.

石英晶体材料电子阻抗共振特性测量完成之后, 采用模拟退火优化算法计算了对应的材料特性参数. 图 1 是分别在 25 $^{\circ}\text{C}$ 和 100 $^{\circ}\text{C}$ 温度条件下, 样品电子阻抗共振特性的实测值和计算值. 从图中可以看出, 不论是在室温条件下还是在 100 $^{\circ}\text{C}$ 温度条件下, 石英晶体样品的电阻和电抗共振特性的实际测量值与理论计算值都符合较好.

表 1 是采用模拟退火优化算法分别计算得到石英晶体材料在 25 $^{\circ}\text{C}$ 至 100 $^{\circ}\text{C}$ 的材料特性参数, 这些特性参数的虚部与实部的比值表示损耗角的正切值. 从表 1 中可以看出, 当环境温度从 25 $^{\circ}\text{C}$ 上

表 1 不同温度条件下 AT 切向石英晶体样品部分材料参数计算结果

材料参数	25 $^{\circ}\text{C}$	40 $^{\circ}\text{C}$	60 $^{\circ}\text{C}$	80 $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$
f_p/MHz	2.056	2.058	2.061	2.063	2.066
$\epsilon_{11}^S/10^{-9} \text{ F/m}$	0.0991	0.0993	0.0997	0.0101	0.1020
$\epsilon_{11}'/\epsilon_{33}^S$	0.0275	0.0238	0.0198	0.0165	0.0147
k_{15}	0.0384	0.0389	0.0392	0.0396	0.0401
k_{15}'/k_{15}	-0.1097	-0.1167	-0.1253	-0.1376	-0.1554
$c_{55}^D/10^{10} \text{ N/m}^2$	6.1112	6.1195	6.1284	6.1324	6.1500
c_{55}'/c_{55}^D	0.0052	0.0059	0.0067	0.0076	0.0083

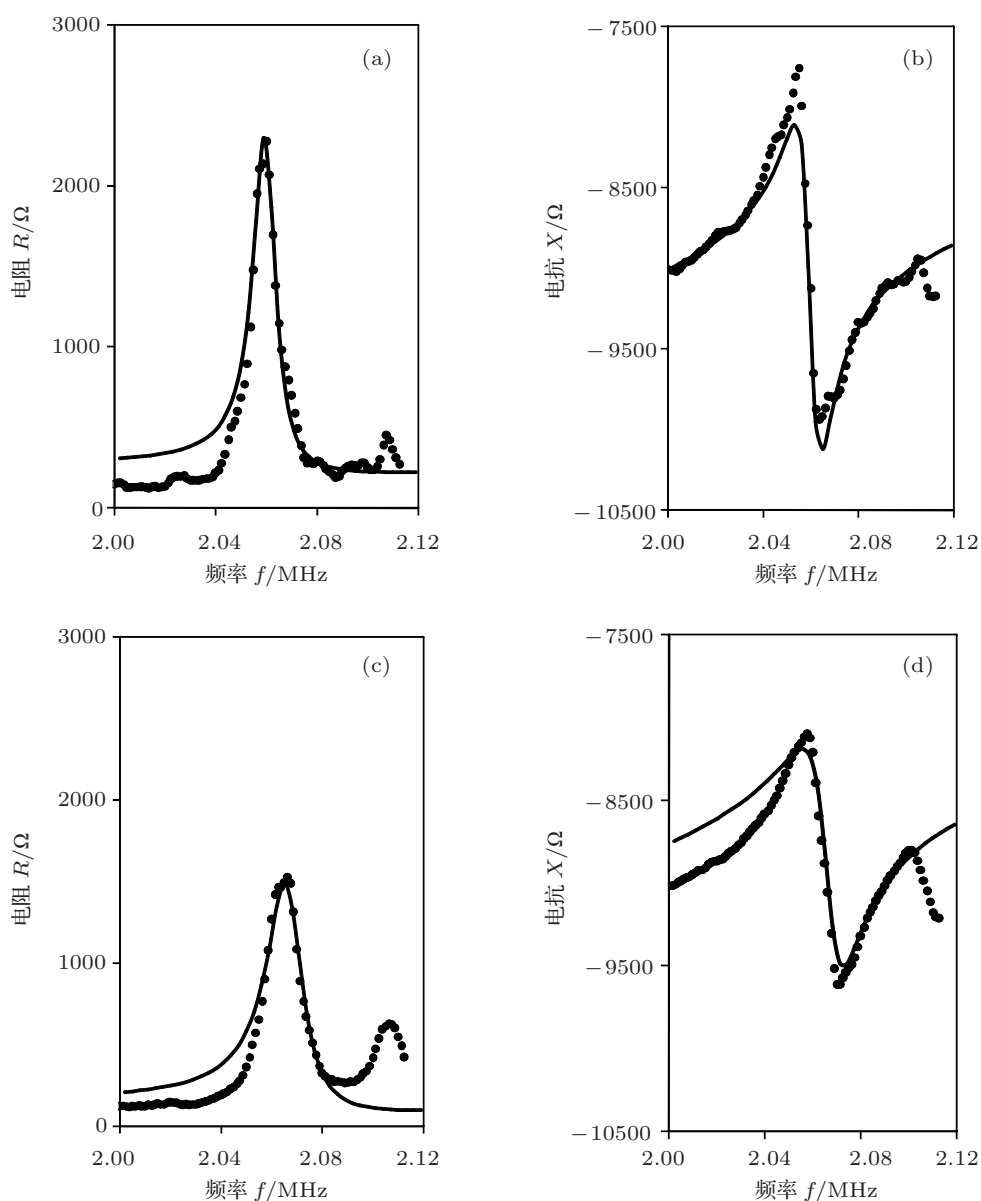


图1 不同温度条件下 AT 切向石英晶体样品的电子阻抗共振特性图 (a) 25 °C 电阻特性; (b) 25 °C 电抗特性; (c) 100 °C 电阻特性; (d) 100 °C 电抗特性; 实心圆点和实线分别表示实测值和计算值

升到 100 °C, 反共振频率 f_p 从 2.056 MHz 上升到 2.066 MHz, 上升了 0.49%. 在本文研究的温度范围内与高居里温度的偏铌酸铅压电陶瓷^[12]相比, 除了随温度变化趋势不同之外, 温度特性也相对稳定. 由于在本文研究的温度范围内, 石英晶体热膨胀系数小于 0.01%^[13], 本文中对其影响予以忽略, 因此 f_p 的变化直接反映了石英晶体声速随环境温度的变化. 作为声速和密度的函数, 弹性常数 c_{55}^D 则随温度上升从 6.1112×10^{10} N/m² 增加到 6.1500×10^{10} N/m², 增长了 0.63%. 由于忽略了石英晶体热膨胀效应, 其密度随温度的变化也相应地不予考虑, 因而弹性常数 c_{55}^D 的变化则归因于石英晶

体声速的变化. k_{15} 和 ϵ_{11}^S 则分别从 25 °C 的 0.0384 和 0.0991×10^{-9} F/m 增加到了 100 °C 的 0.0401 和 0.1020×10^{-9} F/m, 分别上升了 4.43% 和 2.92%. 在损耗特性方面, c_{55}^{D*} 和 k_{15}^* 损耗角正切的绝对值都随着温度上升至 100 °C 分别增加了 59.61% 和 41.66%, 而 ϵ_{11}^{S*} 虚部与实部的比值则随着环境温度上升而下降了 46.55%. 与材料参数实部相比, 对应的相对损耗参数随温度改变而变化的幅度更大.

4 结 论

本文研究了不同环境温度条件下石英材料的

特性变化. 采用基于模拟退火优化算法的压电材料表征方法对从室温至 100 °C 不同温度下石英晶体材料的电子阻抗共振特性实际测量值进行了精确的拟合, 并计算出了 AT 切向石英晶体材料在不同温度下包含损耗特性的复材料参数. 计算结果表明, 随着环境温度从 25 °C 升至 100 °C, 石英晶体样品

的反共振频率有所上升, 等应变介电常数、机电耦合系数以及开路弹性常数的实部都有不同程度的增加, 而相应的相对损耗特性则产生了不同趋势但是幅度更大的相对变化. 本文的研究结果为设计具有稳定温度特性的精密振荡器提供了理论和技术支持.

-
- [1] Lam C S 2008 *Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium* Beijing, China, August 2–5, 2008 p694
 - [2] Lim J, Kim H, Jackson T N, Choi K, Kenny D 2010 *IEEE Trans Ultrason. Ferroelectr Freq. Control* **57** 1906
 - [3] Martin G, Wall B 2006 *Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium* Vancouver, Canada, October 3–6, 2006 p825
 - [4] Petie D, Cesar E, Bar P, Joblot S, Parat G, Berchaud O, Barbier D, Carpentier I J F 2008 *Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium* Beijing, China, August 2–5, 2008 p895
 - [5] *IEEE Standard* 176–1987
 - [6] Sherrit S, Wiederick H D, Mukherjee B K 1992 *Ferroelectrics* **134** 111
 - [7] Smiths J G 1976 *IEEE Trans. Sonics. Ultrasonics* **23** 393
 - [8] Kwok K W, Chan H L W, Choy C L 1997 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **44** 733
 - [9] Dong Y, Wu Z, Hu H, Wu B, Xu G 2010 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **57** 2613
 - [10] Vig J 1992 *Introduction to Quartz Frequency Standards* Fort Monmouth, USA, October 1992
 - [11] Beaver W D, Lau C K, Sun X M, Xu S K 2002 *Proceedings of IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition* New Orleans, USA, May 29–31, 2002 p361
 - [12] Wu Z, Cochran S, Hurrell A 2008 *Electron. Lett.* **44** 940
 - [13] Ward R W 1992 *Proceedings of 14th Piezoelectric Devices Conference and Exhibition* Salt Lake City, USA, September 15–17 1992

Study of quartz temperature characteristics for precise oscillator applications*

Zhu Hua-Bing¹⁾ Wu Zheng-Bin²⁾† Liu Guo-Qiang³⁾ Xi Kui²⁾
Li Shan-Shan²⁾ Dong Yang-Yang²⁾

1) (*Institute of New Weaponry and Application, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*)

2) (*Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055 China*)

3) (*Guangdong Failong Crystal Technology Co., Ltd, Dongguan 523757, China*)

(Received 11 June 2012; revised manuscript received 2 August 2012)

Abstract

In this paper, we report on the study of quartz material characteristic variation with temperature for precision oscillator applications with a novel piezoelectric material precise characterization method. Electrical impedance resonant characteristics of AT cut quartz sample are measured at temperatures ranging from ambient temperature up to 100 °C. These measured results are fitted with a simulated annealing optimization algorithm to accurately calculate complex material parameters comprising loss characteristics. Effects of temperature change on quartz material characteristics and their loss are analyzed. This paper offers theoretical and technical supports to the design of precision oscillators with stable temperature characteristics.

Keywords: quartz, oscillator, temperature characteristics, piezoelectric material parameters

PACS: 42.70.Ce, 77.65.Fs, 65.40.-b, 77.84.-s

DOI: 10.7498/aps.62.014205

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10804075), and the Comprehensive Strategic Cooperation Project of Guangdong Province and China Academy of Sciences (Grant No. 2010B090300004).

† Corresponding author. E-mail: zb.wu@siat.ac.cn