

# 一种钽酸锂压控振荡器的设计与实现

王艳<sup>1</sup>, 崔莹<sup>1</sup>, 黄显核<sup>2</sup>

(1. 西南石油大学 电气信息学院, 四川 成都 610500; 2. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 611731)

**摘要:**该文使用具有低电容比、宽调谐范围的钽酸锂晶体设计了一巴特勒共基低相位噪声压控振荡器, 此设计在寻求高有载品质因数  $Q_L$  的同时保持了振荡器的输出功率。使用的钽酸锂晶体的无载品质因数  $Q_0$  约为  $1.24 \times 10^3$ , 其频率为 10.727 MHz。设计出的巴特勒振荡器  $Q_L \approx 33\% Q_0$ , 输出功率约为 11 dBm。不加压控的情况下, 实际测得该振荡器的相位噪声结果为  $-85$  dBc/Hz@10 Hz 和  $-145$  dBc/Hz@1 kHz。在此基础上, 增加一变容二极管作为压控元件设计了钽酸锂压控振荡器, 在 2~10 V 范围内, 测得控制电压压控斜率约为  $86.6 \times 10^{-6}/V$ , 相位噪声测试结果优于  $-82$  dBc/Hz@10 Hz 和  $-142$  dBc/Hz@1 kHz, 实现了具有宽调谐范围的低相位噪声钽酸锂振荡器的设计。

**关键词:** 压控振荡器; 相位噪声; 钽酸锂晶体; 有载品质因数

**中图分类号:** TN75 **文献标识码:** A

## Design and Implementation of a Lithium Tantalate Voltage Controlled Oscillator

WANG Yan<sup>1</sup>, CUI Ying<sup>1</sup>, HUANG Xianhe<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. School of Automation, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** A wide tuning range Butler common-base low phase noise voltage controlled oscillator is designed by using the lithium tantalate crystal with low capacitance ratio and wide tuning range in this paper. A compromise between seeking high loaded quality factor  $Q_L$  and maintaining oscillator output power is considered in this design. The unloaded quality factor  $Q_0$  of Lithium Tantalate crystal is about  $1.24 \times 10^3$ , and its frequency is about 10.727 MHz. The loaded quality factor  $Q_L$  of the designed Butler oscillator is about 33% of  $Q_0$  and the output power is 11 dBm. The measured phase noises are  $-85$  dBc/Hz@10 Hz and  $-145$  dBc/Hz@1 kHz respectively without adding voltage control. After adding a varactor as the voltage control component, a Lithium Tantalate voltage controlled oscillator is designed. Its voltage controlled slope are  $86.6 \times 10^{-6}/V$  and its measured phase noise results are better than  $-82$  dBc/Hz@10 Hz and  $-142$  dBc/Hz@1 kHz when the control voltage range is from 2 V to 10 V. The Lithium Tantalate voltage controlled oscillator design with wide tuning range and low phase noise has been realized.

**Key words:** voltage controlled oscillator; phase noise; lithium tantalate crystal; loaded quality factor

## 0 引言

钽酸锂晶体具有良好的电光、声光效应及压电性能, 具有零温度系数切型, 且钽酸锂谐振器的无载品质因数  $Q_0$  比 LC 谐振高, 机电耦合系数  $k_t$  高达 47%。因此, 钽酸锂谐振器具有低电容比, 可用于宽频带压控振荡器的设计<sup>[1-3]</sup>。

振荡器作为产生时间频率基准的关键器件, 其相位噪声成为限制电子系统性能的关键因素之一<sup>[4-8]</sup>。通过对 Leeson 模型的分析可知, 回路半带

宽的相位噪声随振荡器有载品质因数  $Q_L$  的增加而减小。因此, 高  $Q_L$  对降低半带宽的相位噪声有利<sup>[9-12]</sup>。该文使用低电容比, 宽调谐范围的钽酸锂晶体设计了一巴特勒共基振荡器, 在寻求高  $Q_L$  和保持输出功率的前提下进行了合理的折衷, 并给出了实测相位噪声结果。

## 1 钽酸锂晶体振荡器 $Q_L$ 表达式的计算

从振荡器频谱的角度出发, 对于双极型晶体管振荡器,  $Q_L$  定义为<sup>[13-15]</sup>

收稿日期: 2017-01-04

基金项目: 四川省科技厅应用基础项目资助 (2014JY0208); 西南石油大学科研起航计划项目资助 (2014QHZZ026)

作者简介: 王艳(1986-), 女, 山东德州人, 讲师, 博士, 主要从事频率控制技术的研究。E-mail: wangyan80410468@163.com。

$$Q_L = \frac{\omega_0}{2} \left| \frac{d}{d\omega} \ln \frac{z_{11}(\omega)}{z_{12}(\omega)} \right|_{\omega=\omega_0} \quad (1)$$

式中： $\omega$  为角频率； $\omega_0$  为对应于振荡频率  $f_0$  的角频率； $z_{11}(\omega)$ ， $z_{12}(\omega)$  均为电路阻抗矩阵  $Z$  的参数。

该文讨论一巴特勒共基钽酸锂(LT)晶体振荡器，等效电路如图 1 所示。图中， $L$  为电感。

$$Q_L = \frac{\omega_0}{2} \left| \left( \ln \frac{z_{11}}{z_{12}} \right)' \right| = \frac{\omega_0}{2} \cdot \left| \frac{d}{d\omega} \ln \frac{\Delta_1 \cdot \Delta_2 + j\omega C_q \cdot (R_L + j\omega L) - j\omega^3 LC_1 C_q R_L}{-j\omega^3 LC_1 C_q R_L} \right|_{\omega=\omega_0} \quad (2)$$

式中： $L_q$ 、 $C_q$ 、 $R_q$  分别为 LT 晶体的动态电感、动态电容和动态电阻； $\Delta_1 = [(j\omega C_1 + j\omega C_2)(R_L + j\omega L) - j\omega^3 LC_1 C_2 R_L]$ ； $\Delta_2 = (j\omega R_q C_q + 1 - \omega^2 L C_q)$ 。

图 1 中，钽酸锂晶体为由中国电子科技集团公司第二十六研究所提供的 X 切型晶体，其等效参数静态电容  $C_0 = 4.0 \text{ pF}$ ， $L_q = 3.8 \times 10^{-4} \text{ H}$ ， $C_q = 5.791 \times 10^{-13} \text{ F}$ ， $R_q = 20.6 \text{ }\Omega$ ，其中心频率  $f_0 = 10.727 \text{ MHz}$ ，电容比  $C_0/C_q = 6.9$ 。根据谐振器的参数，计算得到钽酸锂晶体的  $Q_0 \approx 1.24 \times 10^3$ ，使用 Agilent E5062A 网络分析仪和一个自制的  $\pi$  型网络测得谐振器的传输特性如图 2 所示。

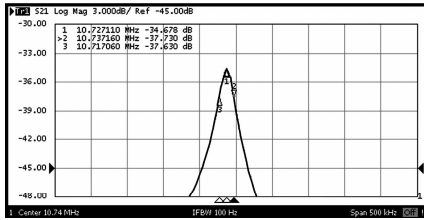


图 2 钽酸锂谐振器传输特性

因为图 1 中  $L$  和电容  $C_1$ 、 $C_2$  满足

$$\frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} = f_0 \quad (3)$$

且  $f_0 = 10.727 \text{ MHz}$ ，因此，电路中  $L = 3.9 \times 10^{-6} \text{ H}$ 。根据谐振器及电路中各参数的取值，利用 Matlab 对式(2)进行了计算，所得结果如表 1 所示。

表 1 对应于不同  $C_2$  的  $Q_L$  值

$C_2/\text{pF}$	$Q_L$	$(Q_L/Q_0)/\%$
200	227	18.3
300	373	30.1
400	499	40.2
500	605	48.9

由表 1 可知， $Q_L$  随  $C_2$  增大而增大，即适当增大  $C_2$  可降低振荡电路的相位噪声。但  $C_2$  过大会影响振荡电路的输出功率。因此， $C_2$  取值时应综合考虑  $Q_L$  和振荡器的输出功率。

## 2 钽酸锂晶体振荡器的相位噪声测试

根据上述的计算结果分析，设计了一个具有低

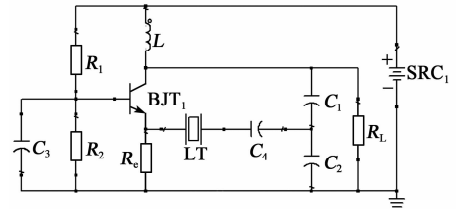


图 1 钽酸锂晶体振荡器等效电路

根据式(1)和图 1 可得此电路的  $Q_L$  值为

相位噪声的巴特勒共基钽酸锂晶体振荡器，设计中，双极性晶体管 BJT<sub>1</sub> 选用 2SC3356，电源电压为 15 V，工作电流 12 mA。当与钽酸锂串联的电容  $C_4 = 200 \text{ pF}$ ， $C_2 = 160 \text{ pF}$  时，用安捷伦信号源分析仪 E5052B 测试了此时的钽酸锂振荡器相位噪声，相噪指标为  $-81 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ Hz}$  和  $-143 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ kHz}$ 。

综上所述可知，增加  $C_2$  有利降低相位噪声。因此，测试了当  $C_4 = 200 \text{ pF}$ ， $C_2 = 330 \text{ pF}$  时的相位噪声曲线，得出在 10 Hz、1 kHz 频偏处的相位噪声分别可达  $-85 \text{ dBc/Hz}$ 、 $-145 \text{ dBc/Hz}$ 。测试结果对比如表 2 所示。

表 2 不加压控下的钽酸锂振荡器的相位噪声

$C_2/\text{pF}$	10 Hz 频偏处的相位噪声/(dBc/Hz)	1 kHz 频偏处的相位噪声/(dBc/Hz)
160	-81	-143
330	-85	-145

由表 2 可见，通过提高电容  $C_2$  的取值增大  $Q_L$  设计出的振荡器可达较良好的相位噪声水平。考虑到钽酸锂晶体能承受较强的激励，为提高输出功率，在压控振荡器设计中设  $C_2 = 330 \text{ pF}$ ，此时  $Q_L \approx 413$ ，利用式(3)计算可得此时  $C_1 \approx 68 \text{ pF}$ 。表 3 为测试得到此时钽酸锂振荡器的实际调谐范围。

表 3 钽酸锂振荡器的调谐范围

$C_4/\text{pF}$	测试频率/Hz
$\infty$	10 735 221
200	10 751 567
75	10 777 744
51	10 794 586

由表 3 可看出，钽酸锂晶体振荡器比声体波振荡器的调谐范围宽。

## 3 压控振荡器的设计及相位噪声测试分析

在以上设计的基础上，增加一压控元件来实现钽酸锂晶体振荡器的电压频率调谐。压控元件选择由 Philips Semiconductors 公司生产的低电压变容二极管 BB155 与电路中的电容  $C_4$  并联，BB155 电容-电压变化曲线如图 3 所示。

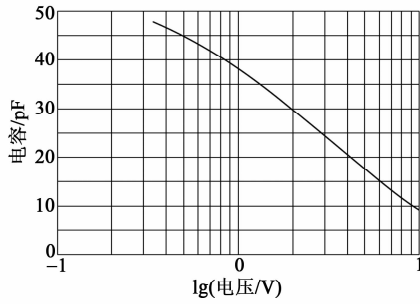


图 3 BB155 电容-电压变化曲线

图 4 为  $C_2=330\text{ pF}$ ,  $C_4=75\text{ pF}$ 、压控电压  $8\text{ V}$  时,测得的压控振荡器相位噪声特性曲线。表 4 为控制电压  $2\sim 10\text{ V}$  间变化时测得的频率值。

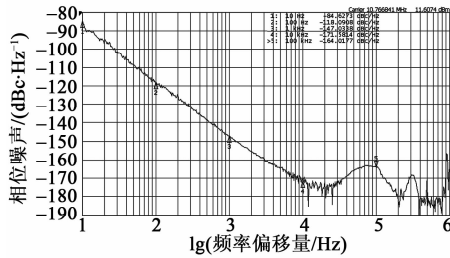


图 4 压控振荡器的相位噪声特性曲线

表 4  $C_4=75\text{ pF}$ 、不同控制电压下的测试频率

控制电 压/V	测试频 率/Hz	相位噪声/(dBc/Hz)	
		10 Hz 频偏处	1 kHz 频偏处
2	1 0760 458	-82	-142
4	10 763 533	-85	-145
6	10 765 457	-86	-148
8	10 766 841	-84	-147
10	10 767 891	-85	-146

由表 4 可知,当控制电压为  $2\sim 10\text{ V}$  时,此压控振荡器的压控斜率约为  $86.6\times 10^{-6}/\text{V}$ ,且测得的钽酸锂压控振荡器的相位噪声特性优于  $-82\text{ dBc/Hz}@10\text{ Hz}$ 、 $-114\text{ dBc/Hz}@100\text{ Hz}$  和  $-142\text{ dBc/Hz}@1\text{ kHz}$ 。

#### 4 结束语

本文在基于对振荡器有载品质因数  $Q_L$  的计算和分析设计了一种钽酸锂晶体振荡器,其相位噪声水平可达到  $-85\text{ dBc/Hz}@10\text{ Hz}$ 、 $-145\text{ dBc/Hz}@1\text{ kHz}$ ,并通过增加了一压控元件 BB155 实现了电压频率调谐,测试结果表明,此钽酸锂振荡器可实现宽调谐范围下的低相位噪声特性。

#### 参考文献:

[1] 赵声衡,赵英. 晶体振荡器[M]. 北京:科学出版社, 2008: 267-268.  
 [2] RUBIOLA E. Phase noise and frequency stability in oscillators [M]. Norwood, NY: Cambridge University Press, 2009, 112-113.  
 [3] DRISCOLL M M, VALE C R, WEINERT R W. Measurement of flicker noise in high-Q, lithium tantalate,

bulk wave resonators [C]//Denver: IEEE Ultrasonics Symposium, 1987: 347-352.  
 [4] 王艳,黄显核. 一种巴特勒低噪声声表面波振荡器的设计[J]. 压电与声光,2013,35(2):162-164.  
 WANG Yan, HUANG Xianhe. A design of Butler low phase noise SAW oscillator [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(2): 162-164.  
 [5] APTE A M, PODDAR A K, RUDOLPH M, et al. A novel low phase noise X-band oscillator[J]. IEEE Microwave Magazine, 2015, 16(1): 127-135.  
 [6] SEONG T, KIM J J, CHOI J. Analysis and design of a core-size-scalable low phase noise LC-VCO for multi-standard cellular transceivers[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Regular Papers, 2015, 62(3): 781-790.  
 [7] MAZZANTI A, BEVILACQUA A. On the phase noise performance of transformer-based CMOS differential-pair harmonic oscillators[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Regular Papers, 2015, 62(9): 2334-2341.  
 [8] EL-GOUHARY A, NEIHART N M. An analysis of phase noise in transformer-based dual-tank oscillators [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Regular Papers, 2014, 61(7): 2098-2109.  
 [9] LEESON D B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum[J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(2): 329-330.  
 [10] HUANG Xianhe, TAN Feng, WEI Wei, et al. A revisit to phase noise model of Leeson [C]//Geneva: IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, 2007: 238-241.  
 [11] MURPHY D, RAEL J J, ABIDI A A. Phase noise in LC oscillators: a phasor-based analysis of a general result and of loaded Q[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2010, 57(6): 1187-1203.  
 [12] DJURHUUS T, KROZER V, VIDKJER J, et al. Oscillator phase noise: a geometrical approach [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Regular Papers, 2009, 56(7): 1373-1382.  
 [13] OHIRA T. Rigorous Q-factor formulation for one-and two-port passive linear networks from an oscillator noise spectrum viewpoint [J]. IEEE Transactions on Circuits and System—II Express Brifs, 2005, 52(12): 846-850.  
 [14] OHIRA T, ARAKI K. Active Q-factor and equilibrium stability formulation for sinusoidal oscillators [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Express Briefs, 2007, 54(9): 810-814.  
 [15] HUANG Xianhe, WANG Yan, FU Wei et al. The design and implementation of a 120 MHz Pierce low-phase-noise crystal oscillator[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(7): 1302-1306.