

引用格式：戴昌名，占开忠，蒋松涛，等. 一种小型化低相噪恒温晶体振荡器的设计[J]. 时间频率学报, 2024, 47(2): 97-103.

# 一种小型化低相噪恒温晶体振荡器的设计

戴昌名，占开忠，蒋松涛，吴海钧

成都天奥电子股份有限公司，成都 610036

**摘要：**在恒温晶体振荡器的工作原理及主要指标分析的基础上，通过采用低相噪电路设计技术，选用具有高  $Q$  值、低老化的 SC 切晶体谐振器，以保证恒温晶体振荡器的低相噪和高稳定度；通过高精度的温度控制电路设计技术以及合理的热结构设计，以实现恒温晶体振荡器的高频率温度稳定度。结果表明恒温晶体振荡器在小体积尺寸下(20 mm × 20 mm × 12 mm)，其相位噪声达到 -110 dBc/Hz@1 Hz，短期稳定度达到  $6.85 \times 10^{-13}/1$  s。

**关键词：**恒温晶体振荡器；小型化；高稳定度；低相位噪声

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-02-0097-07

## Design of a miniaturized low phase noise OCXO

DAI Chang-ming, ZHAN Kai-zhong, JIANG Song-tao, WU Hai-jun

Chengdu Spaceon Electronics Company Limited, Chengdu 610036, China

**Abstract:** Based on the analysis of the operating principle and main indicators of the oven controlled crystal oscillator (OCXO), the low phase noise circuit design and the SC cut crystal resonator with high  $Q$  value and low aging are adopted to ensure the low phase noise and high stability of the OCXO. By using high precision temperature control circuit design and reasonable thermal structure design, high frequency temperature stability of OCXO is achieved. The results show that the phase noise of OCXO reaches -110 dBc/Hz @1 Hz and the short-term stability reaches  $6.85 \times 10^{-13}$  at 1 second with a small size of 20 mm × 20 mm × 12 mm.

**Key words:** oven controlled crystal oscillator (OCXO); miniaturization; high stability; low phase noise

恒温晶体振荡器(OCXO)是通过温度控制电路将晶体谐振器和振荡电路保持在一个特定的极小温度范围内<sup>[1]</sup>，利用在这个温度附近晶体谐振器的频率温度系数小的特性，将外界温度变化对振荡器输出频率的影响降低至最小。OCXO 被广泛应用于各个领域，是通讯、导航、雷达、电子对抗及许多测量仪器必不可少的部件<sup>[2]</sup>。随着电子设备的发展，对 OCXO 的稳定度、体积等性

能提出了更高的要求。国外对于恒温晶体振荡器的研究开展时间较早，凭借技术的长期积累，小型化设计技术、低相噪设计技术在国外已相对成熟，并成熟应用于商品化产品中。国内在小型化低相噪恒温晶体振荡器方面研制工作开展了许多年，但是频率温度稳定性、相位噪声等综合指标相比于国际领先水平还有一定差距<sup>[3]</sup>。对此，本文研制出了一种 10 MHz 低相噪恒温晶体振荡器(体

积为 20 mm × 20 mm × 12 mm), 并对晶振中应用的电路设计进行了分析, 测试结果表明在小体积的条件下能够实现晶振的低相噪及高稳定性。

## 1 理论分析

### 1.1 晶体谐振器的切型

为了实现恒温晶体振荡器的低相位噪声、高精度、高频率温度稳定度的指标, 需要对晶体谐振器的切型进行合理选择, 由于 DT、CT、BT 等切型晶体的频率温度特性较差<sup>[4]</sup>, 因此恒温晶体振荡器常用的晶体切型有 AT 切和 SC 切(应力补偿切割, Stress Compensated Cut)两种, 典型切型的石英晶体频率温度特性曲线见图 1。

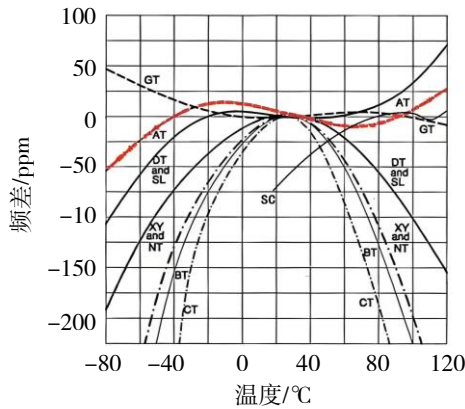


图 1 典型切型的石英晶片温度频差特性曲线<sup>[1]</sup>

对比 AT 切和 SC 切晶体的频率温度特性可以发现, 在相同的控温条件下, SC 切晶体在 87 °C ± 7 °C 的高温区, 比 AT 切晶体的频率温度系数有一个数量级的优势。即在同样的恒温精度条件下, 采用 SC 切晶体可以获得比 AT 切晶体高一个数量级的频率温度稳定度, 这对晶振实现高稳定性有较大的帮助。

通过 AT 切和 SC 切晶体在各性能指标上的对比, 我们发现 SC 切晶体具有许多优越的特性<sup>[5]</sup>, 主要包括:

- ① SC 切改善了晶体的短期频率稳定性和频率老化;
- ② 恒温区域内频率温度系数小<sup>[6]</sup>, 更适宜于恒温晶体振荡器;
- ③ 相同工作频率和泛音次数的晶体, SC 切有更高的  $Q$  值。

通过各方面的比较, SC 切型的晶体比 AT 切晶体在研制低相位噪声、高稳定性恒温晶体振荡器时有明显的优势, 因此采用高精度的 SC 切晶体谐振器。

### 1.2 相位噪声控制分析

由 Lesson 模型, 振荡器的单边带相位噪声  $\mathcal{L}(f_m)$  可表示为<sup>[7]</sup>

$$\mathcal{L}(f_m) = \frac{1}{8} \frac{FkT}{P_{ai}} \left( \frac{f_0}{f_m} \right)^2 \left( \frac{P_i}{\omega_0 W_e} + \frac{1}{Q_{UL}} + \frac{P_o}{\omega_0 W_e} \right) \left( 1 + \frac{f_c}{f_m} \right) \quad (1)$$

式(1)中:  $\omega_0 W_e$  为电抗功率;  $\omega_0$  为谐振频率;  $P_o$  为输出信号功率;  $P_i$  为反馈输入信号功率;  $P_{ai}$  为主振信号输出功率;  $f_0$  为载波频率;  $f_m$  为偏离载波频率;  $F$  为主振噪声系数;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度;  $Q_{UL}$  为谐振回路品质因数;  $f_c$  为拐角频率。由式(1)可以看出: 要降低晶体振荡器的输出相位噪声  $S_{\phi}(\omega_m)$ , 可以从以下几个方面来考虑。

- ① 主振电路选用在同样的晶体激励电平时输出更高的信号功率, 可减少放大器引入的调相噪声。
- ② 应选择低噪声指数  $F$  的有源器件。  $F$  是指在实际阻抗环境下有源器件的噪声系数。
- ③ 选择低闪烁噪声  $1/f$  的有源器件<sup>[8]</sup>。
- ④ 晶体管的静态工作点要选择最佳应用点上。
- ⑤ 减小无源网络的噪声, 主要是减小电阻的热噪声和电流噪声来实现。

⑥ 选用  $Q$  值高的谐振器<sup>[9]</sup>。同时优化调整电路参数, 尽量提高谐振器的有载  $Q$  值。当电路选定后确定合理晶体的频差、适当加大负载电容。同时合理控制晶体两端的输入阻抗和输出阻抗, 因为外接阻抗和旁路电阻的热噪声使晶体有载  $Q$  值下降。

通过上述 6 个方面, 有效提升恒温晶体振荡器的相位噪声指标。

### 1.3 恒温控制分析

恒温晶体振荡器需要将晶体与振荡电路置于恒温槽中, 目的在于当外界温度发生变化时, 使晶体和振荡电路受影响降到最小, 控温反馈回路的设计是实现整个控温过程的关键, 它的好坏直接影响控温精度<sup>[10]</sup>。模拟控制系统其控制电路调节

精度高、目标温度调节方便，有利于高稳定度的需求。由于该设计中恒温晶体振荡器工作在环境温度  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而放在恒温槽内的晶体与振荡电路，实际上是处于恒温槽内的温度场内，温度场务必会随环境温度而变化，因此，要求能够根据外界环境温度变化控制恒温槽内的温度场变化最小而选取适当的控制策略，提升恒温晶体振荡器的频率温度特性。

## 2 电路设计

该恒温晶体振荡器的总体方案见图 2，电路主要包括：稳压电路、振荡电路、控温电路、放大电路。

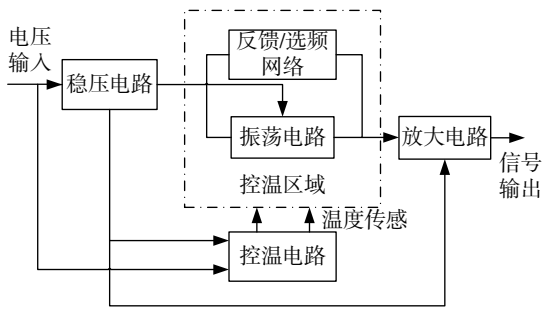


图 2 晶振总体方案框图

### 2.1 振荡电路

振荡电路采用电路形式简单、可靠性高的 Colpitts 振荡电路，振荡信号直接从晶体谐振器引出，充分利用了晶体谐振器的选频特性<sup>[11]</sup>；Colpitts 振荡器的基本结构及线性反馈模型如图 3 所示。

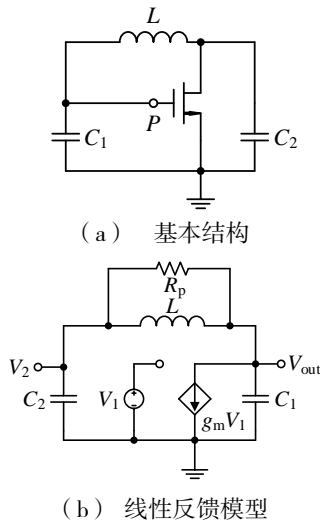


图 3 Colpitts 振荡器

由图 3 (b) 得出环路增益表达式<sup>[12]</sup>：

$$\frac{V_2}{V_1}(s) = -g_m \frac{R_p + sL}{s^3 LC_1 C_2 R_p + s^2 L(C_1 + C_2) + s R_p (C_1 + C_2)} \quad (2)$$

式(2)中， $L$  为电感， $R_p$  为并联损耗电阻， $g_m$  为晶体管跨导。根据式(2)中相位条件，其分子实部与虚部比值应等于分母实部与虚部比值，见式(3)所示：

$$\frac{R_p}{\omega_{osc} L} = \frac{-\omega_{osc}^2 L(C_1 + C_2)}{-\omega_{osc}^3 LC_1 C_2 R_p + \omega_{osc} R_p (C_1 + C_2)} \quad (3)$$

得到振荡频率  $\omega_{osc}$  见式(4)所示：

$$\omega_{osc} = \frac{1}{\sqrt{LC_1 C_2}} \sqrt{1 + \frac{1}{Q^2}} \approx \sqrt{\frac{1}{L} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)} \quad (4)$$

式(4)中， $Q$  表示谐振腔  $Q$  值，满足  $R_p = \omega L Q$ 。由式(4)中幅度条件，振荡器起振条件见式(5)：

$$g_m R_p \geq \frac{(C_1 + C_2)^2}{C_1 C_2} \geq 4 \quad (5)$$

Colpitts 振荡电路将晶体谐振器作为电路谐振元件的同时，还将其作为窄带滤波器使用，既保证了振荡电路的高  $Q$  特性，又因为高  $Q$  窄带滤波的良好频率选择性而呈现更好的频谱纯度，从而提升电路的有载  $Q$  值，可以降低静态相位噪声。振荡电路交流等效电路图如图 4 所示。

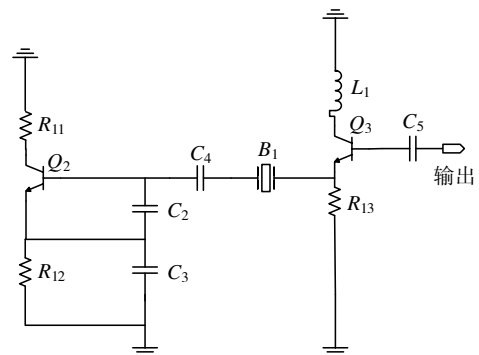


图 4 振荡电路交流等效电路图

通过对相位噪声控制的理论分析结合实践经验，振荡电路  $Q_2$ 、 $Q_3$  均选用低闪烁噪声的有源器

件,并且对器件设置最佳的静态工作点、合理的激励电平,晶体谐振器  $Q$  值  $> 1\ 100\ 000$ ,  $C_2$ 、 $C_3$ 、 $L_1$  采用高  $Q$  值的电容及电感,有效降低相位噪声。

## 2.2 控温电路

精密恒温槽是利用晶体谐振器在零温度系

数点附近频率温度系数小的特性,将晶体谐振器和振荡电路等器件维持在零温度系数点范围内<sup>[13]</sup>,保证频率稳定度,控温电路采用了高精度直接放大式连续温度控制电路,控温电路原理框图见图 5。

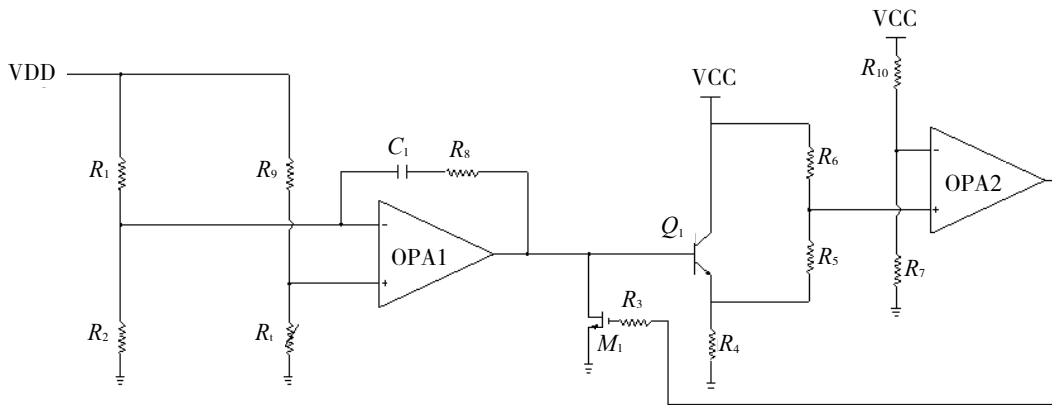


图 5 控温电路原理图

图 5 中 OPA1、OPA2 为运算放大器,  $Q_1$  为功率管,  $M_1$  为 MOS 管,  $R_1$  为负温度系数的热敏电阻, 固定电阻  $R_1$ 、固定电阻  $R_2$ 、可调节电阻  $R_9$  以及热敏电阻  $R_1$  共同构成电桥, 以实现通过热敏电阻  $R_1$  对恒温槽内的温度进行测量, 此时热敏电阻  $R_1$  的阻值将根据恒温槽温度的变化而变化, 进而通过该热敏电桥向功率管  $Q_1$  输出相应的输入电压, 实现控制功率管  $Q_1$  的输出功率, 以调节恒温槽的温度。调节电容  $C_1$  以及固定电阻  $R_8$  实现对控温电路的比例积分微分反馈调节, 保证控温电路具有良好的控制性能。

运算放大器 OPA2、MOS 管  $M_1$ 、固定电阻  $R_3$ 、固定电阻  $R_5$ 、固定电阻  $R_6$ 、固定电阻  $R_7$  以及固定电阻  $R_{10}$  构成了采样比较电路, 实现对功率管  $Q_1$  基级的输入电压进行修正, 进而更加精确地控制功率管  $Q_1$  的功率, 提高温度控制精度, 图 6 是对控温电路进行的仿真结果。

仿真结果表明, 控温电路的控温精度可达到  $0.02\ ^\circ\text{C}$  左右, 实现高精度的温度控制, 保证晶振的高频率温度稳定性。

电路板设计方面, 印制板选用 TG (glass transition temperature) 值大于  $150$  的板材, 耐高温、

耐稳定性等特性能够提升印制板在高温环境下的稳定性, 利于高稳定度晶振的研制; 电路板中的过孔设计采用树脂塞孔工艺, 并且塞孔后沉铜确保表面平整, 保证过孔在高温下能够保持温度一致性, 提升信号的稳定性; 选择高拐点且在拐点温度附近频率稳定度高的晶体谐振器; 由于功率管为发热元器件, 热敏电阻的位置应尽量靠近功率管, 振荡电路、稳压电路、变容二极管等温度敏感器件均应放置在恒温槽内, 尽可能保持在一个热梯度, 以提高频率温度稳定性。在高低温下 ( $-40\ ^\circ\text{C}$  ~  $70\ ^\circ\text{C}$ ), 通过对晶振内部热敏电阻阻值的测量, 可以推算出晶振核心控温区域的实际温度, 如图 7 所示为测试曲线。

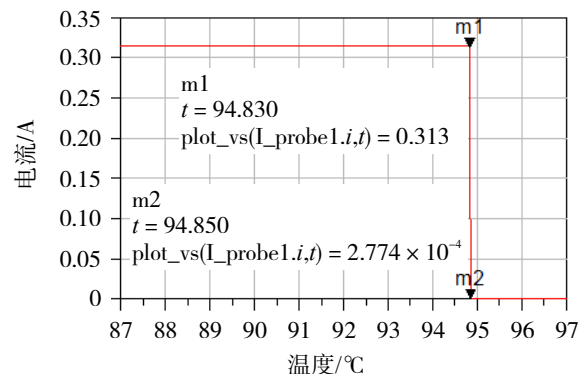


图 6 控温电路仿真结果

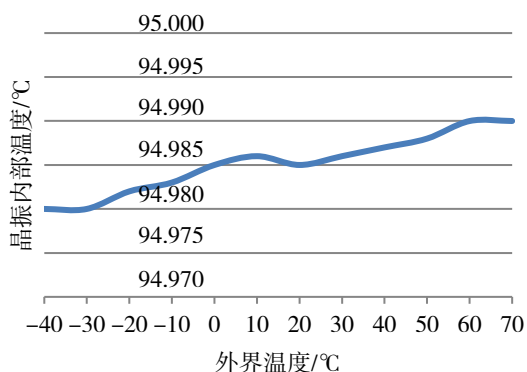


图 7 晶振内部温度测试曲线

由图 6 仿真结果可知,控温电路的精度可以达到  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,结合图 7 对晶振内部温度的实测值,晶振在常温条件下( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),内部温度为  $94.985\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,与设计值  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  相差  $0.015\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,符合设计的温度控制精度( $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。在高低温条件下( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),晶振内部核心控温区域温度为  $94.98\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 94.99\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,波动为  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,实现了高精度、高稳定度的温度控制。

### 2.3 稳压电路

振荡电路的噪声主要由振荡电路的参数、晶体谐振器和电源供电电路噪声共同决定,所以我们对晶振的供电电路噪声引起足够的重视,选用合适的供电电路形式,降低此部分的电路噪声。

为保证稳压电路的稳定性,稳压电路采用低噪声线性稳压器,并通过将稳压器输出端连接到一个具有大的电源纹波抑制作用而同时具有低噪声特性的运算放大器来作为供电单元,设置合理

的滤波电容,可以有效减少电源电压变化对晶振性能造成的影响,显著降低电源噪声<sup>[14]</sup>。低噪声的电源设计,能够有效提升恒温晶体振荡器近端相位噪声指标。

### 2.4 放大电路

本款晶振输出波形为方波,为满足输出信号的频谱纯度以及保证阻抗匹配,放大电路采用低噪声逻辑非门进行缓冲放大输出,并在逻辑非门后端增加  $\pi$  型匹配网络,能够适应不同的负载条件,提升恒温晶体振荡器在不同应用中的匹配度<sup>[15]</sup>。

## 3 研制结果

根据上述电路设计,研制出了  $10\text{ MHz}$  恒温晶体振荡器,图 8 为实物图。

图 8  $10\text{ MHz}$  恒温晶体振荡器实物图

主要技术指标设计要求值和实际测试值的对照表,其结果参见表 1。

表 1 晶振技术指标对照表

技术指标	要求值	测量值
波形	方波	方波
频率温度稳定性 ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	$\leq \pm 1 \times 10^{-9}$	$\leq \pm 3 \times 10^{-10}$
相位噪声 ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	$\leq -105\text{ dBc/Hz}@1\text{ Hz}$	见图 9 测试曲线
	$\leq -140\text{ dBc/Hz}@10\text{ Hz}$	
	$\leq -155\text{ dBc/Hz}@100\text{ Hz}$	
	$\leq -165\text{ dBc/Hz}@1\text{ kHz}$	
	$\leq -170\text{ dBc/Hz}@10\text{ kHz}$	
短期稳定度 ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	$\leq 8 \times 10^{-13}/1\text{ s}$	见图 10 测试曲线

相位噪声实际测试结果如图 9 所示。

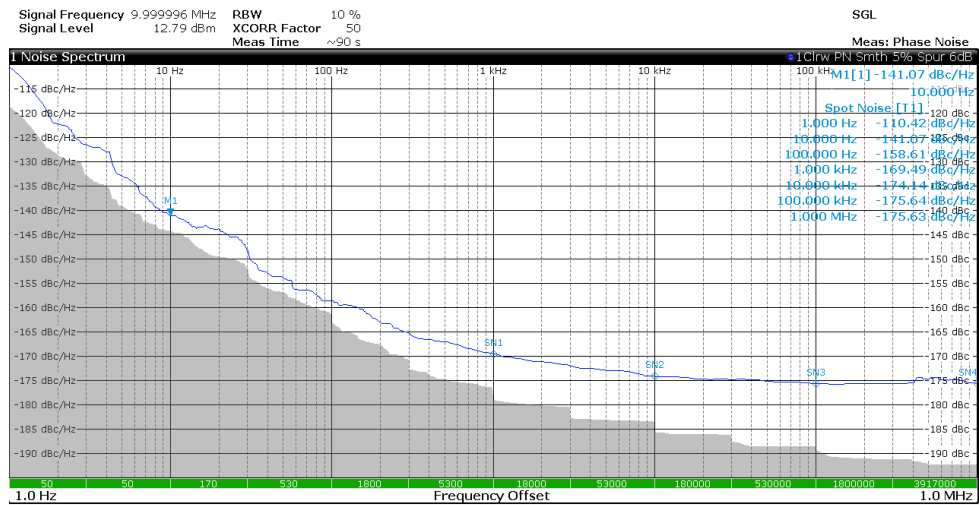


图 9 相位噪声测试结果

短期稳定度测试结果如图 10 所示。

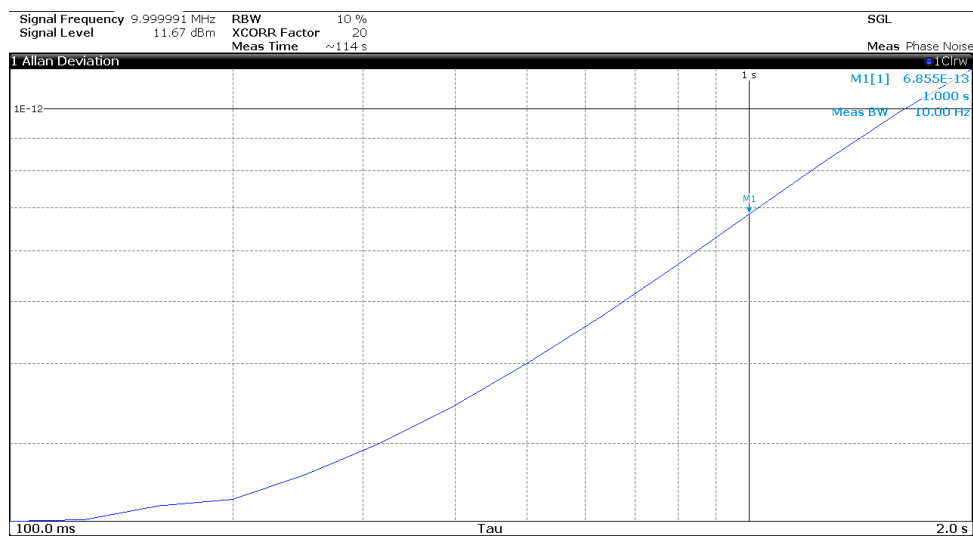


图 10 短期稳定度测试结果

从上述的测试结果可看出，研制出了小型化 10 MHz 恒温晶体振荡器，实现了低相位噪声（近端  $-110$  dBc/Hz@ 1 Hz，远端达到  $-175$  dBc/Hz@ 100 kHz），高稳定度（短期稳定度达到  $6.85 \times 10^{-13}/1$  s）的指标。

#### 4 结语

本文对小型化低相噪 10 MHz 恒温晶体振荡器的研制过程进行了分析，通过对晶体谐振器切

型、振荡电路中噪声的理论分析，采用高  $Q$  值 SC 切晶体谐振器、设置合理的参数等措施，有效提升相位噪声指标；通过对控温电路、印制板板材、工艺、布局等方面的综合分析，采用了高 TG 值板材、树脂塞孔等工艺措施，并对电路板布局进行优化设计，达到了高精度温度控制的目的；结合低噪声稳压电路设计以及适应不同负载的放大电路设计，研制出的恒温晶体振荡器能够在小体积下实现低相噪、高稳定度的指标，为恒温晶体振荡器的小型



化、低相噪、高稳定度设计技术积累了经验,具有借鉴意义。

### 参考文献:

- [1] 赵声衡, 赵英. 晶体振荡器[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2008: 15-18.
- [2] 刘明亮. 振荡器的原理与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983: 70-95.
- [3] 毛兴武, 李德勇, 高希常. 石英晶体振荡器的发展及其在无线系统中的应用[J]. 电子元件应用, 2000, 2(4): 20-25.
- [4] 罗福臻. BT 切高 Q 值精密石英谐振器[J]. 湖南大学学报, 1994, 21(4): 20-25.
- [5] 罗福臻. 高精度 SC 切石英谐振器[J]. 湖南大学学报, 1988, 15(3): 253-256.
- [6] 卜冬. 石英晶振相关特性的研究及边沿效应的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015: 10-11.
- [7] 徐伟. 低相位噪声石英晶体振荡器设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2004: 32-35.
- [8] 李立波. 高稳定度晶体振荡器特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 20-23.
- [9] 孙晓英. 100 MHz 低相噪高稳定石英晶体振荡器的研制[J]. 电讯技术, 2008, 48(4): 106-109.
- [10] 黎黎. 高性能恒温晶体振荡器温度控制系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009: 7-12.
- [11] 陈小林, 屈攀, 王祝盈, 等. 用“负阻”概念设计石英晶体 Colpitts 振荡电路[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 394-396.
- [12] 耿建强. 20 MHz CMOS 工艺低功耗低相位噪声石英晶体振荡器设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2005: 10-13.
- [13] 刘晓菊, 秦玉浩, 杨磊, 等. 一种低相噪恒温晶体振荡器的研制[C]// 2015 全国时间频率学术会议, 北京: 全国时间频率学术会议组委会, 2015: 450-454.
- [14] 王洪来. 低压差线性稳压器的设计及其在通信电源管理芯片的应用[D]. 天津: 南开大学, 2009: 19-21.
- [15] 行鸿彦. 基于非门电路的高增益交流放大器理论研究与应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2002, 16(1): 54-59.