

交叉耦合结构集成石英晶体振荡器 相位噪声与稳定性研究*

谢海情¹, 曾承伟¹, 曾健平^{2†}, 贾新亮¹, 王超¹, 王龙¹, 陈玉辉¹, 李洁颖¹

(1. 长沙理工大学 物理与电子科学学院, 湖南 长沙 410114;

2. 湖南大学 物理与微电子科学学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:通过对相位噪声进行频域分析, 构建 Lesson 噪声优化模型, 优化电路参数; 并分析预抑制电路的小信号模型, 优化其元器件参数, 研究带 RC 滤波器的 CMOS 交叉耦合结构振荡器的相位噪声和稳定性. 基于 NUVOTON 0.35 μm 工艺, 采用 Cadence 完成电路设计、优化与仿真, 版图设计与后仿真, 并最终完成流片、测试. 结果表明: 在电源电压为 3.3 V 时, 该振荡器的输出信号频率为 20 MHz, 相位噪声分别为 $-135 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ kHz}$, $-156.4 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ kHz}$, $-169.2 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ MHz}$. 当电源电压在 $\pm 10\%$ 范围变化时, 频率波动小于 81×10^{-6} ; 在工作温度 $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ 至 $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, 频率波动小于 71×10^{-6} .

关键词:石英晶体振荡器; 相位噪声; 稳定性; 预抑制

中图分类号: TN432

文献标志码: A

Study on Phase Noise and Stability of Cross-coupled Integrated Quartz Crystal Oscillator

XIE Haiqing¹, ZENG Chengwei¹, ZENG Jianping^{2†}, JIA Xinliang¹,
WANG Chao¹, WANG Long¹, CHEN Yuhui¹, LI Jieying¹

(1. School of Physics & Electronic Science, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. School of Physics and Electronics, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: By the frequency domain analysis of phase noise, the optimization model of Lesson noise was established and the parameters in the circuit were improved. Meanwhile, the small signal model was established to optimize the parameters in the pre-suppression circuit. In this way, the phase noise and stability were studied for the cross-coupled integrated quartz crystal oscillator with RC filter. Furthermore, the circuit and layout were designed, simulated and optimized by Cadence with NUVOTON 0.35 μm process. Subsequently, the fabrication and test were carried out under the supply voltage of 3.3 V. The results indicated that the frequency of output was 20 MHz and the phase noise of the oscillator can reach $-135 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ Hz}$, $-156.4 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ kHz}$, and $-169.2 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ Hz}$, respectively. The ripple wave was

* 收稿日期: 2017-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61404011), National Natural Science Foundation of China(61404011); 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ3001), Natural Science Foundation of Hunan Province of China(2015JJ3001); 湖南省教育厅资助科研项目(17B007), Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department(17B007)

作者简介: 谢海情(1982-), 男, 湖南耒阳人, 长沙理工大学副教授, 博士

† 通讯联系人, E-mail: zengjp@hnu.edu.cn

less than 81 ppm and 71 ppm, respectively, with the variation of the supply voltage in the range of $\pm 10\%$ and the temperature range from $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $85\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: quartz crystal oscillator; phase noise; stability; pre-suppression

时频检测与控制电路广泛应用于导航、通信、计量等领域中. 晶体振荡器作为参考频率源,其精确度、稳定性是影响系统性能的重要参数指标^[1]. 晶体振荡器的短期频率稳定度在频域内的表征为相位噪声,因此,晶体振荡器的相位噪声具有重要的研究意义^[2]. 杨晓等在传统三点式振荡器中增加增益控制环路,提高了振荡器相位噪声性能^[3]. 唐路等人提出了一种 PMOS 差分结构降低相位噪声^[4]. Siwiec 等人提出了一种双反馈回路结构降低相位噪声^[5]. 谢海情等人提出一种 CMOS 交叉耦合结构的石英晶体振荡器,并采用 RC 滤波和预抑制电路降低电路的噪声^[6-7]. 然而,在石英晶体振荡器中,除晶体振荡结构外,电路中其他元器件的噪声也会影响电路的相位噪声. 通过构建电路的相位噪声模型,可以优化电路相位噪声性能^[8-9]. 在传统的相位噪声模型中,当振荡器工作在谐振频率附近时,放大器的增益近似保持不变. 因此,在分析晶体振荡器接近载波频率处的相位噪声时会出现一定的偏差,且无法得到优化 RC 滤波器的方法. 另外,在相位噪声模型分析中,无法构建温度、电源影响晶体振荡器相位噪声的模型. 但是,温度影响器件的跨导,电源电压含有纹波,都会影响晶体振荡器的相位噪声,进一步影响其稳定性.

本文通过分析带 RC 滤波的 CMOS 交叉耦合结构石英晶体振荡器的小信号电路,构建其优化相位噪声模型,进一步优化电路参数. 另外,对预抑制电路的小信号电路进行分析,优化电路参数,提高对电源纹波的抑制作用. 从而降低该振荡器的相位噪声,提高其稳定度. 最终完成流片测试.

1 振荡电路相位噪声的优化模型

本文所研究的 CMOS 交叉耦合石英晶体振荡器如图 1 所示. 其中,CMOS 交叉耦合结构等效为负阻,为振荡器提供能量,并且该结构具有低相位噪声特性; R_3 、 R_4 为共模反馈电阻,保证电路输出稳定的直流电平. 输出端分别接石英晶体的两端, C_3 、 C_4 为晶体的负载电容,与晶体形成谐振网络;同时在 PMOS 对和 NMOS 对的输出端加入 RC 高通滤波

器,滤除电路中的低频噪声.

对于图 1 所示交叉耦合振荡器,构建 Lesson 模型时可将振荡器看作是由放大器和谐振网络组成的正反馈系统. 整个电路的相位噪声为:

$$S_{\varphi}(\omega_m) = S_{\Delta\varphi}(\omega_m) \left[1 + \left(\frac{\omega_0}{2Q\omega_m} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中: $S_{\Delta\varphi}(\omega_m)$ 是放大器输出单边带相位噪声谱密度.

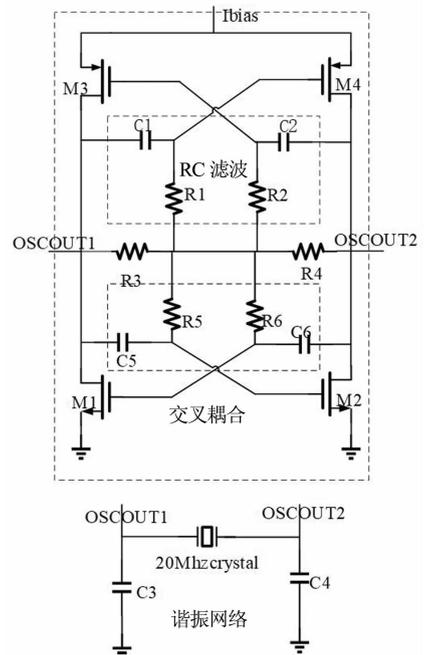


图 1 CMOS 交叉耦合结构石英晶体振荡电路
Fig. 1 CMOS cross-coupled structure of quartz crystal oscillator circuit

放大器输出单边带相位噪声谱密度由白噪声和闪烁噪声组成. 其中白噪声的主要来源是 MOS 管的沟道热噪声和电阻的热噪声. 闪烁噪声可以从工艺库中 BSIM3 模型可得. 根据热噪声和闪烁噪声表达式即可得到放大器的等效输入噪声 $S_{\Delta\varphi}(\omega_m)$. 正如上面所说,采用式(1)分析晶体振荡器接近载波频率处的相位噪声时会出现一定的偏差,且无法得到优化 RC 滤波器的方法.

对于图 1 所示的振荡器环路,我们可以将其分为放大器模块,传输函数为 $G(v)$, 和包括石英晶体在内的谐振网络模块,传输函数为 $H(v)$. 其闭环模型如图 2 所示. 可以得到闭环模型的相位波动为

$\varphi_i(t)$ 时的闭环功率谱密度 S_{φ}^{CL} :

$$S_{\varphi}^{CL}(v) = \frac{1}{|GH(f) - 1|^2} [(G(f))^2 S_{nh}(f) + S_{\Delta\varphi}(\omega_m)] \quad (2)$$

式中: $S_{nh}(v)$ 和 $S_{\Delta\varphi}(\omega_m)$ 分别是谐振网络的噪声功率谱密度和放大器的噪声功率谱密度.

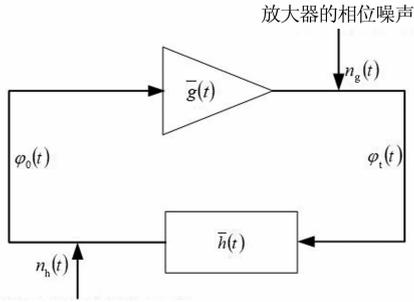


图2 振荡器相位噪声的闭环电路模型
Fig. 2 Closed-loop circuit model for oscillator phase noise

式(2)是晶体振荡器相位噪声的改进模型,根据振荡器不同频率点的相关函数来计算其相位波动的功率谱密度,并根据功率谱密度确定其是谐振网络还是放大器引起的相位噪声.

尽管石英晶体也会引入部分闪烁噪声和热噪声,但相比于交叉耦合放大器引入的噪声,其可以忽略.因此,相位波动的闭环功率谱密度可简化为

$$S_{\varphi}^{CL}(v) = \frac{1}{|GH(f) - 1|^2} S_{\Delta\varphi}(\omega_m) \quad (3)$$

式中: $G(f)$ 、 $H(f)$ 为放大器模块、谐振网络的传输函数.

将图1所示带RC滤波器的交叉耦合放大器等效为两级共源放大器串联反馈,其反馈模型如图3所示.根据该模型推导振荡器环路的传输函数.从图3可以看出,该交叉耦合结构的前馈网络和反馈网络是完全一样的.因而,先算出一共源放大器(含RC高通滤波器)的传输函数,然后再用反馈理论即可算出整个交叉耦合振荡器的传输函数.

RC高通滤波器的传输函数为:

$$AV_{RC}(f) = \frac{j2\pi RCf}{1 + j2\pi RCf} = \frac{j(f/f_c)}{1 + j(f/f_c)} \quad (4)$$

式中: f_c 为RC高通滤波器的截止频率.

共源放大器的传输函数为:

$$AV_{amp}(f) = g_{m1}(Z_{load}(f) \parallel 2(r_{o2} \parallel r_{o1} \parallel \frac{1}{g_{m2}})) \quad (5)$$

式中: $Z_{load}(f)$ 是共源放大器的负载阻抗,包括石英晶体模型和反馈网络的阻抗,其表达式为:

$$Z_{load}(f) = (R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2}) \parallel (\frac{1}{j2\pi f(C_s + C_{L1})}) \parallel (\frac{1}{j2\pi f C_{L1}} + Z_{XTAL}(f)) \quad (6)$$

式中: C_3 和 C_4 是石英晶体的负载电容; C_2 是 M_1 和 M_2 在输出节点的寄生电容; R_1 和 C_1 是电路中的后级RC高通滤波器.

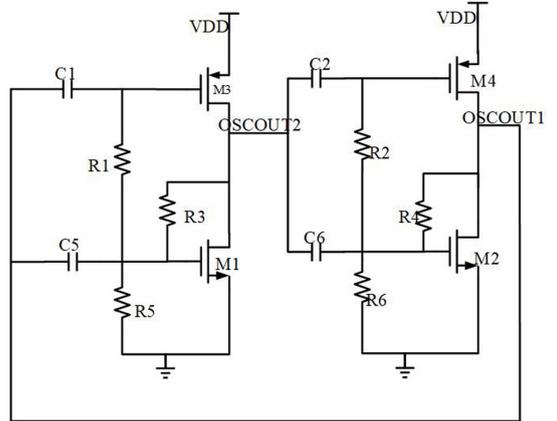


图3 交叉耦合振荡电路的反馈模型
Fig. 3 Feedback model for cross-coupled oscillatory circuits

从而,一级共源放大器的传输函数 $AV(f)$ 为:

$$AV(f) = AV_{RC}(f)AV_{amp}(f) = \frac{j2\pi RCf}{1 + j2\pi RCf} g_{m1}(Z_{load}(f) \parallel 2(r_{o1} \parallel r_{o2} \parallel \frac{1}{g_{m2}})) \quad (7)$$

利用反馈原理,得到整个交叉耦合电路的传输函数为:

$$G(f) = \frac{AV(f)}{1 - AV^2(f)} \quad (8)$$

石英晶体振荡器的谐振网络的传输函数为:

$$H(f) = \frac{1/j2\pi C_{L1} f}{1/j2\pi C_{L1} f + h} \quad (9)$$

式中: $h = (j2\pi f L_m + 1/j2\pi C_m f + R_m) \parallel (1/j2\pi C_0 f)$

所以,该振荡器的传输函数为:

$$AV_{open}(f) = G(f)H(f) \quad (10)$$

扰动即是叠加在振荡波形上的干扰,我们定义 $\Delta f = |f - f_c|$ 为载波频率 f_c 的傅里叶偏离频率.从式(3)可知,振荡器的相位噪声就是放大器等效输入噪声乘以一个电路噪声调制系数.

$$L(\Delta\omega) = 10 \log_{10} (\frac{1}{|GH(f) - 1|^2}) \quad (11)$$

2 电路参数优化

根据式(11),振荡器的相位噪声和稳定性与输出阻抗(MOS管的宽长比)和RC滤波器有关.这给我们提供了优化电路参数的依据.

2.1 MOS 管宽长比的优化

由公式(7)、(8)、(9)和(11)可知,增大输出阻抗,可提高电路的相位噪声性能.在公式(7)中,电路的等效输出电阻为:

$$R_p = r_{on} \parallel r_{op} \parallel \frac{1}{g_{mn} + g_{mp}} \quad (12)$$

由式(12)可知,在给定偏置电流条件下

$$R_p \propto \frac{1}{\left(\frac{W}{L}\right)} \quad (13)$$

因此,为了提高电路的输出阻抗,从而提高电路的相位噪声性能,就是要增加电路的输出阻抗,由式(13)可知,应降低 MOS 管的宽长比.但减小管子面积会增加 MOS 管的闪烁噪声,因此,我们保持 $W = 140 \mu\text{m}$ 不变,增大 L 值.相位噪声随沟道长度 L 的变化曲线如图 4 所示,可以看出增大沟道长度 L 确实可以降低相位噪声,但 L 增大到一定程度后,相位噪声的改善有限,并且会降低交叉耦合结构的跨导,使电路难以起振,也会影响电路的温度稳定性.综合考虑各项性能,最终取 $L = 4 \mu\text{m}$,也就是宽长比 $W/L = 140/4$.

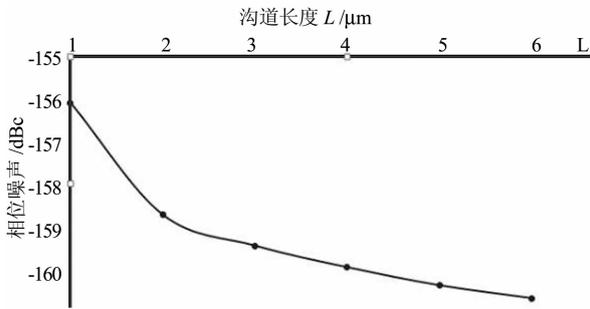


图 4 相位噪声随沟道长度变化的仿真结果
Fig. 4 Simulation results of phase noise with different channel length

2.2 RC 滤波器的优化

振荡器相位噪声随 RC 的变化曲线如图 5 所示.由于截止频率过低,RC 电路的滤除噪声有限,而截止频率过高时,电路又难以起振.因此,RC 扫描频率范围取 $10 \sim 20 \text{ MHz}$.再者,RC 滤波器主要滤除的是低频噪声,因此,我们取在 $@100 \text{ Hz}$ 左右处的相位噪声.

可以看出,截止频率一定时,随着电容的减小,相位噪声性能略有下降,且幅度很小.考虑到版图面积增大引入的噪声耦合和寄生效应,以及电阻大小对电路温度稳定性的影响,选取 $C = 3 \text{ pF}$, $R = 5 \text{ k}\Omega$.此时,RC 高通滤波器的截止频率约为 10 MHz .

2.3 预抑制电路

电源的纹波也是电路的噪声源之一,影响振荡

器的相位噪声,进而影响电路输出频率的稳定性.因此,在电源通路上,增加预抑制电路抑制电源噪声,如图 6 所示.其中, M_{12} 宽长比很大,可以将 $V_{GS,12}$ 钳位在阈值电压附近, M_9 、 M_{10} 、 M_{11} 、 M_7 、 M_8 、 M_{12} 和 M_{13} 构成反馈调节电路.当 M_{11} 、 M_{12} 的偏置电压增大时,通过反馈, $V_{GS,M_{13}}$ 将减小. C_7 和 R_7 构成密勒补偿电路,使环路稳定.该反馈环路的直流开环增益很大,从而将偏置电压 V_{REG} 钳位到一个恒定的值.使得 V_{REG} 随电源电压变化非常小.

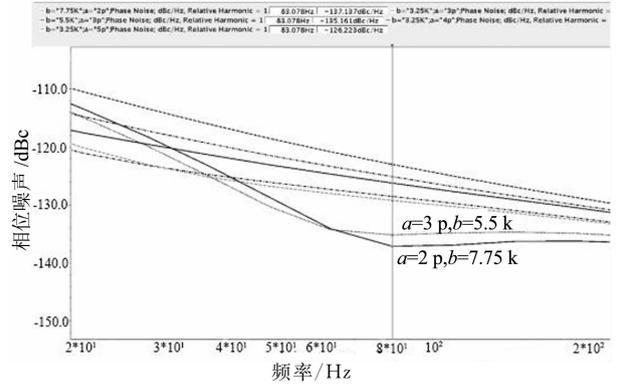


图 5 振荡器相位噪声随 RC 滤波器的变化
Fig. 5 Oscillator phase noise changes with different RC value

该反馈环路的直流开环增益可表示为:

$$A = g_{m12} \left(\frac{W}{L}\right)_{M7,8,9,10} (R_{DS,M7} \parallel R_{DS,M8}) \quad (14)$$

由式(14)可知环路增益为一个较大的值,这使得 V_{REG} 随电源电压变化非常小.图 7 为预抑制电路的电源小信号模型.

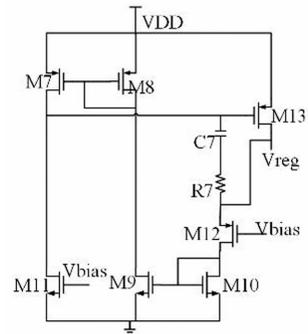


图 6 预抑制电路
Fig. 6 Pre-suppression circuit

根据图 6 中电压电流的关系可得:

$$V_{REG} = \frac{p - q + rV_{DD}}{s + k} \quad (15)$$

$$\text{式中: } p = (g_{m,M9} + \frac{1}{R_3}) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4}\right),$$

$$q = g_{m,M9} \left(g_{m,M11} + \frac{1}{R_0}\right) \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4}\right), r = \frac{g_{m,M9} g_{m,M11}}{R_4}$$

$$s = \left(\frac{1}{R_0 + R_5} + \frac{1}{R_3}\right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4}\right), k = \frac{R_6}{R_5 + R_6} \cdot g_{m,M9} g_{m,M3} g_{m,M4}$$

可见,根据式(15)设置合适的元件参数可使得 V_{REG} 的纹波分量趋近于 0. 这里取 $(W/L)_7 = (W/L)_8 = (W/L)_{12} = 12/0.6$, $(W/L)_9 = (W/L)_{10} = (W/L)_{11} = 4/0.6$, $(W/L)_{12} = 12/0.6 \times 60$, $C_7 = 100 \text{ fF}$, $R_7 = 100 \text{ }\Omega$.

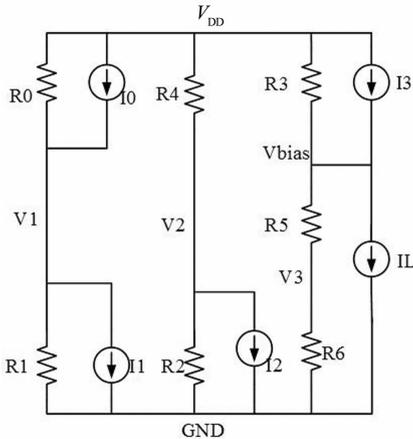


图7 预抑制电路小信号模型

Fig. 7 Small signal model of pre-suppression circuit

3 结果与分析

基于 NUVOTON 0.35 μm 工艺,采用 Cadence 软件中的 Spectre 工具完成电路设计与仿真,在此基础上,基于 NUVOTON0.35 μm dptm 30k 版图工艺,完成该振荡器的版图设计,如图 8 所示.

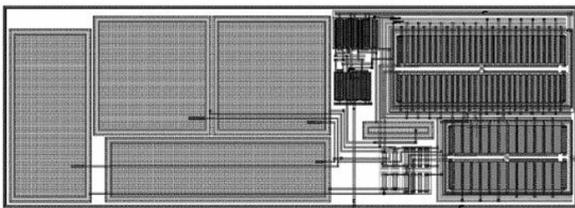


图8 CMOS交叉耦合振荡器版图

Fig. 8 Layout of CMOS cross-coupled oscillator

对版图进行后仿真,该晶体振荡器相位噪声后仿真结果如图 9 所示,可以看出其相位噪声可达到 $-135\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{kHz}$, $-156.4\text{dBc}/\text{Hz}@10\text{kHz}$, $-169.2\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{MHz}$.

对该振荡器的频率稳定性进行高、低压,高、低温频谱扫描,如图 10 所示,在 $V_{DD} = 2.97\text{ V}$ 、 $V_{DD} = 3.63\text{ V}$ 、 $T = -25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T = 85\text{ }^\circ\text{C}$ 时,频率波动分别不大于 81×10^{-6} 、 79×10^{-6} 、 71×10^{-6} 、 66×10^{-6} .

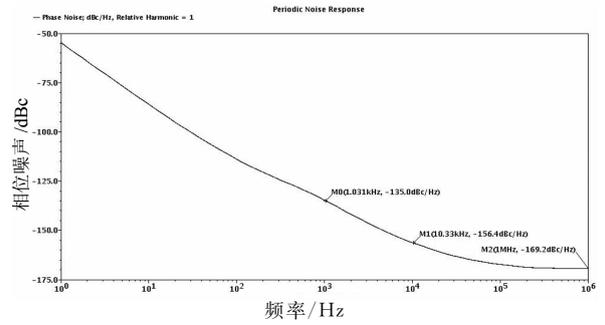
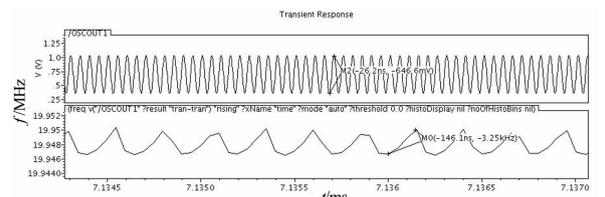
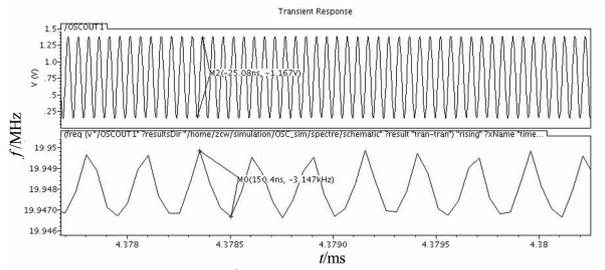


图9 相位噪声后仿真结果

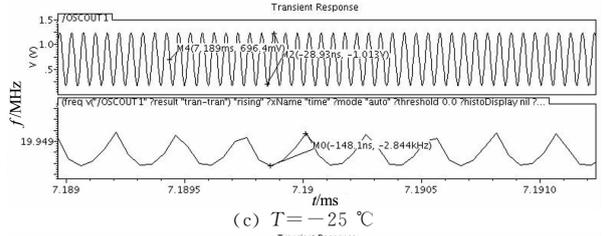
Fig. 9 Simulation results of layout for phase noise



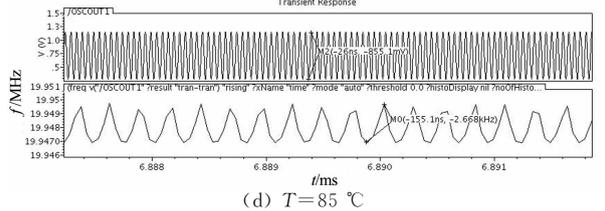
(a) $V_{DD} = 2.97\text{ V}$



(b) $V_{DD} = 3.63\text{ V}$



(c) $T = -25\text{ }^\circ\text{C}$



(d) $T = 85\text{ }^\circ\text{C}$

图10 版图的频谱后仿真

Fig. 10 The simulation of spectrum of layout

最后完成该振荡器的流片与测试. 测试平台如图 11 所示. 其中,使能控制引脚 E_XTAL , E_LDO 接高电平,示波器、频谱仪接 SAM 头 S1~S3.

示波器与频谱仪的输出结果如图 12 所示. 可见,该振荡器的输出频率为 20 MHz,在边带频率上的功率很低,说明该振荡器具有良好的相位噪声和频率稳定性.

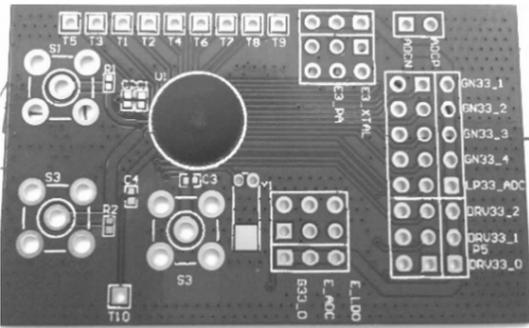


图 11 测试 PCB 板

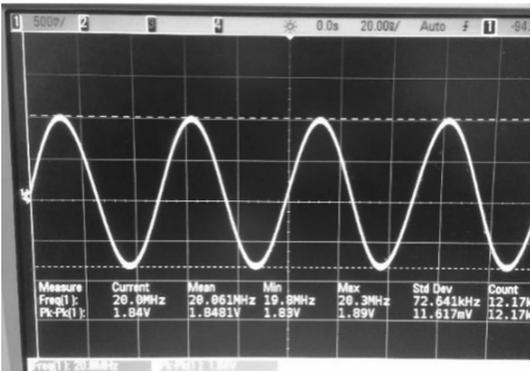
Fig. 11 The PCB board for measurement

4 结 论

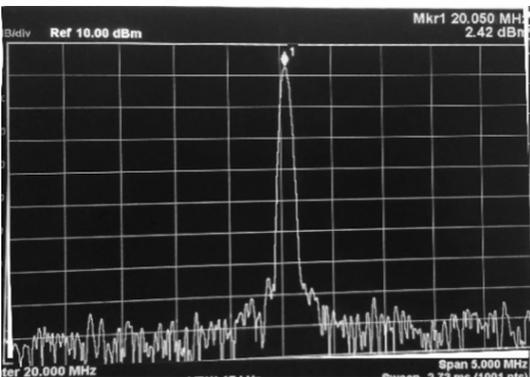
本文通过对带 RC 滤波器的 CMOS 交叉耦合结构石英晶体振荡器的相位噪声进行频域分析,构建其相位噪声的优化模型,并根据该模型优化电路参数.另外,分析预抑制电路的小信号模型,优化其元器件参数.通过电路优化,降低该振荡器的相位噪声,提高频率稳定度.基于 NUVOTON 0.35 μm 工艺,完成电路设计、优化和版图设计,最终完成流片测试.当电源电压为 3.3 V 时,该振荡器的输出频率为 20 MHz,相位噪声为 135 dBc/Hz@1 kHz, -156.4 dBc/Hz@10 kHz, -169.2 dBc/Hz@1 MHz.当电源电压在 $\pm 10\%$ 范围内变化时,频率波动小于 81×10^{-6} ;在 -25 $^{\circ}\text{C}$ 至 85 $^{\circ}\text{C}$ 工作温度范围内,频率波动小于 71×10^{-6} ,可用作为稳定的频率信号源.

参考文献

- [1] 赵声衡. 石英晶体振荡器[M]. 长沙:湖南大学出版社,2008:153-198.
ZHAO S H. Quartz crystal oscillator[M]. Changsha: Hunan University Press, 2008: 153-198. (In Chinese)
- [2] 黎荣林,陈萍萍,黎敏强,等. 一种高稳定恒温晶振的设计[J]. 电子器件, 2016,39(2):329-333.
LI R L, CHEN P P, LI M Q, et al. Design of a high stable constant temperature crystal [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2016,39 (2): 329-333. (In Chinese)
- [3] 杨晓,齐骋,王亮. 一种低相位噪声 CMOS 晶体振荡器的设计[J]. 微电子学,2012,42(5):642-645.
YANG X, QI C, WANG L, et al. Design of a low phase noise CMOS crystal oscillator [J]. Microelectronics, 2012, 42(5): 642-645. (In Chinese)
- [4] 唐路,王志功,曾贤文,等. 一种用于射频调谐器的低相位噪声低功耗晶体振荡器[J]. 东南大学学报(英文版),2012,28(1):21-24.
TANG L, WANG Z G, ZENG X W, et al. A low-phase-noise and lower-power crystal oscillator for RF tuner [J]. Journal of Southeast University(English Edition), 2012, 28(1): 21-24. (In Chinese)
- [5] SIWIEC D K. Crystal oscillator with dual amplitude stabilization feedback loop[C]// Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES), 2012 Proceedings of the 19th International Conference. 2012:231-234.
- [6] 谢海情,曾承伟,曾健平,等. 一种低噪声交叉耦合结构集成石英晶体振荡器[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2017,44(2):117-121.
XIE H Q, ZENG C W, ZENG J P, et al. A low noise cross-coupled structure integrated quartz crystal oscillator[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2017,44 (2): 117-121. (In Chinese)
- [7] XIE H Q, ZENG C W, JIA X L, et al. Optimization for phase noise in cross-coupled integrated quartz crystal oscillator[C]// 2016 International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology.
- [8] WANG Y, HUANG X H. Analysis and design of low phase noise crystal oscillators [C]// Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2012:19-23.
- [9] HUANG X H, CHEN P P, FU W, et al. Prediction, simulation, and verification of the phase noise in 80 MHz low-phase-noise crystal oscillators [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2015, 62(9): 1599-1604.



(a)示波器输出结果



(b)频谱仪输出结果

图 12 流片测试结果

Fig. 12 Measurements results of the chip

表 1 给出了本文优化后的石英晶体振荡器的相位噪声与其他文献的对比.从表 1 中可以看出,通过建立相位噪声优化模型,并根据模型,优化电路参数,该石英晶体振荡器的相位噪声有较大的改善.

表 1 本文与其他文献的相位噪声对比
Tab.1 Comparison of phase noise in this paper with other literatures

文献	本文	[3]	[4]	[5]
Phase noise / (dBc/Hz)				
@1kHz	-135	-121	-134	-
@10kHz	-156.4	-145	-	-160
@1MHz	-169.2	-165	-	-