

基于 $0.18\mu\text{m}$ SiGe BiCMOS 工艺的 60GHz VCO 分析与设计

王 东, 吴玉平, 陈 岚
(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 采用 $0.18\mu\text{m}$ SiGe BiCMOS 工艺, 设计了一个 60GHz 的交叉耦合差分压控振荡器(VCO). 通过分析传输线的性能, 用 $\lambda/4$ 短路传输线构造谐振回路. 在分析 VCO 相位噪声的基础上, 采用噪声滤波技术提高 VCO 的相位噪声性能. 该 VCO 的工作电压为 2.2V, 偏置电流为 11mA, 频率调谐范围为 58.377GHz~60.365GHz. 当振荡频率为 60.365GHz 时, 1MHz 和 10MHz 频偏处的相位噪声分别为 -79.1dBc/Hz 和 -99.77dBc/Hz .

关键词: 锗硅; 压控振荡器; 传输线; 相位噪声

中图分类号: TN752

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)10-0189-04

Analysis and Design of 60GHz VCO Using $0.18\mu\text{m}$ SiGe BiCMOS Technology

WANG Dong, WU Yu-ping, CHEN Lan

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper introduces a 60GHz cross-coupled differential voltage-controlled oscillator (VCO) realized in $0.18\mu\text{m}$ SiGe BiCMOS technology. After analyzing the performance of transmission line, the resonator is fabricated with $\lambda/4$ short-circuited transmission line. This paper presents noise filtering technique to improve the performance of the VCO based on the analysis of phase noise of the VCO. The VCO provides tuning ranges of 58.377GHz~60.365GHz when its bias current is 11mA and supply voltage is 2.2V. The simulation result shows a phase noise of -79.1dBc/Hz at 1MHz offset and -99.77dBc/Hz at 10MHz offset from 60.365GHz carrier.

Key words: SiGe; VCO; transmission line; phase noise

1 引言

SiGe BiCMOS 工艺采用 SiGe 异质结双极晶体管(HBT)作有源器件, SiGe HBT 能同时达到高截止频率 f_T 、低基极电阻 r_B 以及高电流增益 β , 所以 SiGe HBT 的低频噪声、RF 噪声和相位噪声都很小^[1], 相比传统的 CMOS 工艺, SiGe BiCMOS 工艺器件拥有更好的噪声性能. 目前 SiGe HBT 的特征频率已达到几百 GHz 的高水平. 由于能与 CMOS 工艺兼容, SiGe BiCMOS 工艺可以有很高的集成度, 所以 SiGe BiCMOS 工艺大量运用在高性能 VCO 的设计中^[2-3].

60GHz 通信技术在高速、短距离无线传输方面的潜在优势, 可以应用于高清视频在家庭数字设备之间的快速无线传输, 从而把高清媒体引入到家庭网络. 基于 SiGe BiCMOS 工艺的高性能 VCO 成为近年来研究的热点, 文中对 60GHz VCO 进行了分析和设计.

2 60GHz VCO 设计

2.1 相位噪声

相位噪声是衡量振荡器性能的重要参数, Leeson 提出了著名的 Leeson 模型:

$$L\{\Delta\omega\} = 10\log\left[\frac{2FkT}{P_s}\left[1 + \left(\frac{\omega_0}{2Q\Delta\omega}\right)^2\right]\right].$$

$$\left(1 + \frac{\Delta\omega_{1/f^3}}{\Delta\omega}\right) \quad (1)$$

其中, k 是 Boltzman 常数, T 是温度, P_s 是谐振回路的耗散功率. 模型中的 F 是一个实验参数, 需要进行实际测量后拟合得到, 因此它不能预测振荡器的相位噪声性能, 这是 Leeson 模型最大的问题.

Rael 应用周期性稳态频域分析方法, 将实验参数 F 表示为电路参数, 可以使用式(2) 来预测振荡器的相位噪声性能^[4]:

$$F = 1 + \frac{4\gamma I_{bias} R_p}{\pi V_0} + \gamma \frac{4}{9} g_{mbias} R_p \quad (2)$$

上式包括了所有的非线性效应和频率变换. 偏置电流比较小时, 振荡幅度小于电源电压, 差分对表现为纯粹的电流开关, 驱动谐振回路, 此时 $V_0 = (\pi/2)R_p I_{bias}$. 对于这种情况, F 的第二项简化为 2γ . 这意味着, 在 $g_{mbias} R_p$ 保持不变的情况下, 随着尾电流的增长, 噪声因数保持不变, 相位噪声性能改善是 I_{bias} 平方的函数. 然而, 当偏置电流超过临界尾电流时, V_0 被限定在电源电压, 振幅保持不变, 噪声因子随着偏置电流的继续增加而变坏, 恶化了相位噪声. 所以, 为了最小化相位噪声, 由于受到器件的击穿机制和电源电压的限制, 需要折中考虑 I_{bias} 、 R_p 和 Q , 尾电流的大小应该设定为正好把振幅驱动到最大可能值, 即电压受限区和电流受限区的交界处^[5]. 方程同样适用于不同的 BJT-LC 振荡器.

此外, 由于电流源引入的噪声中主要是二阶谐波频率处的热噪声对振荡器相位噪声产生贡献, 利用噪声滤波技术^[6], 将一个大的电容和电流源并联可以衰减二阶谐波频率处的电流源噪声成分, 在电流源和互偶对的共射极之间插入一个电感形成高阻抗, 阻止了线性区工作的互偶对晶体管给谐振回路引入损耗.

2.2 谐振回路

谐振回路是 VCO 的重要部分, 直接影响 VCO 的性能. 文中用 $\lambda/4$ 短路传输线来构造谐振回路, 短路传输线和衬底是隔离的, 这降低了振荡器对衬底影响的敏感性. 即使传输线之间的摆放距离非常小, 短路传输线的隔离层也减小了彼此间的耦合. 此外, 传输线在实际应用中设计比较简单^[7].

$\lambda/4$ 短路传输线谐振回路与并联 RLC 谐振回路是等价的, 如图 1 所示. 其中, $Z_{in, \lambda/4}$ 是 $\lambda/4$ 短路传输线的输入阻抗, $Z_{in, RLC}$ 是并联 RLC 谐振回路的输入阻抗.

$$Z_{in, \lambda/4} = \frac{Z_0}{\alpha l + j\pi\Delta\omega/2\omega_0} \quad (3)$$

$$Z_{in, RLC} = \frac{1}{1/R + j2\Delta\omega C} \quad (4)$$

由上述两式可得:

$$R = \frac{Z_0}{\alpha l}, C = \frac{\pi}{4\omega_0 Z_0}, L = \frac{1}{\omega_0^2 C}, Q = \omega_0 RC \quad (5)$$

其中, Z_0 是 $\lambda/4$ 短路传输线的特征阻抗, α 是衰减系数, l 是传输线的长度^[8].

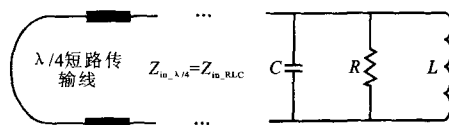


图 1 $\lambda/4$ 短路传输线谐振回路等价于并联 RLC 谐振回路

文中采用单线传输线(singlewire), 选择相应的层分别作为信号线(signal-line)和地线(ground plane). $\lambda/4$ 短路传输线谐振回路的谐振频率本来设定在 60GHz, 但是当它和负阻电路连接时, 负阻电路中晶体管存在的寄生电容会降低谐振回路的谐振频率, 所以谐振回路的谐振频率应设定的比目标频率高. 如图 2 所示, 最终优化的 $\lambda/4$ 短路传输线谐振回路的谐振频率在 110.2GHz.

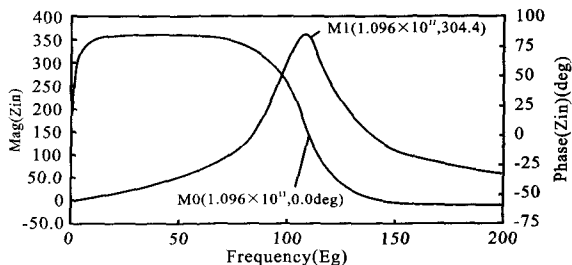


图 2 $\lambda/4$ 短路传输线谐振回路输入阻抗仿真图

2.3 整体电路

图 3 给出了 60GHz 的整体电路图.

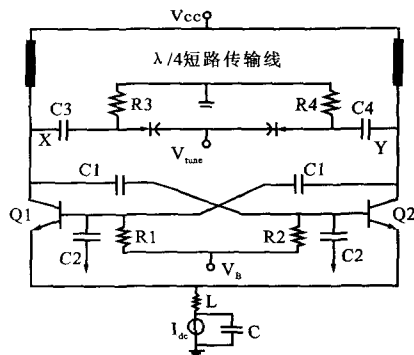


图 3 60GHz VCO 整体电路图

LC 差分负阻振荡器具有提供差分输出、功耗准确控制并能容易起振等优点, 是射频电路最常用的

振荡器拓扑结构. Q_1 、 Q_2 组成交叉耦合差分对, 提供阻值为 $-2/g_m$ 的负阻(g_m 是晶体管的跨导), 补偿谐振回路的能量损耗.

为了避免 Q_1 、 Q_2 发生深度饱和, 在反馈路径上插入电容分压器 C_1 、 C_2 , 以便容许更大的摆幅和在 X、Y 节点的共模电平比在 Q_1 、 Q_2 基极的共模电平更高.

晶体管的工作条件由反馈电容 C_1 、 C_2 以及晶体管基极-发射极寄生电容 C_{BE} 的比值 n 和电路的偏置电流决定^[9]. 其中:

$$n = \frac{C_1 + C_2 + C_{BE}}{C_1} \tag{6}$$

在固定偏置电流下, 电容比值 n 控制着差分对的工作条件. n 越小, 越有利于晶体管进入非线性区域, 并且减少了晶体管的导通时间, 这可以降低相位噪声. 文中为了得到最大的集电极、基极分压比值,

在电路中去掉了 C_2 , 从而 $n = \frac{C_1 + C_{BE}}{C_1}$.

为了充分利用变容二极管的调谐能力, 采用了交流耦合调谐方式. 变容管通过交流耦合电容 C_3 、 C_4 连接到 X、Y 节点, 变容管阳极通过大电阻 R_3 、 R_4 接地. 这扩大了振荡器的调谐范围, 减小了变容管的非线性.

电路的振荡频率主要取决于谐振回路的“LC”值, 和电容 C_1 、 C_2 以及晶体管的寄生电容也有关.

3 仿真结果与分析

采用 SpectreRF 对所设计的电路进行了仿真分析. 为了避免晶体管进入击穿区, 工作电压 V_{CC} 取为 2.2V, 偏置电流为 11mA. 调谐电压 V_{tune} 从 0V 变化到 3V, 相应的频率从 58.377GHz 变化到 60.365GHz, 如图 4 所示.

在 60.365GHz 频率处仿真得到其相位噪声如图 5 所示. 1MHz 及 10MHz 频偏处的相位噪声分别为 -79.1dBc/Hz 、 -99.77dBc/Hz .

为了表征 VCO 的整体性能, 通常引入优值 FOM 的概念. 其定义如下:

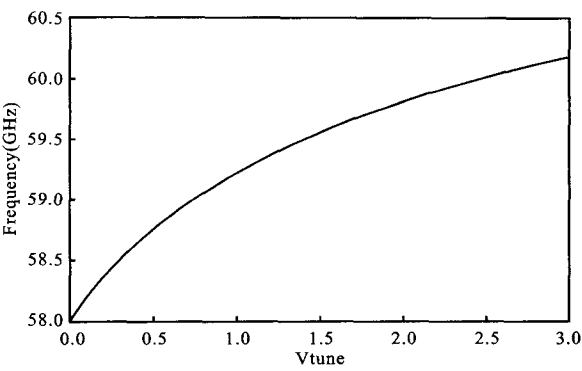


图 4 频率随调谐电压变化的关系图

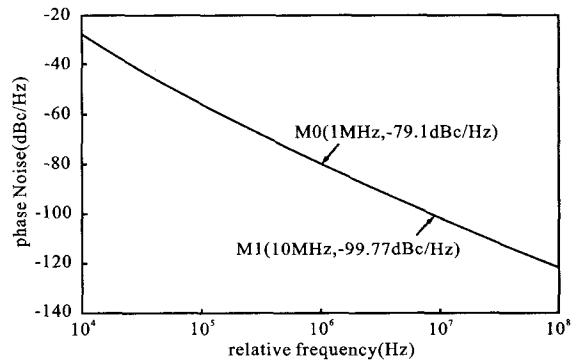


图 5 60.365GHz 频率处 VCO 相位噪声性能

$$FOM = L\{\Delta\omega\} - 20\log\left(\frac{\omega_0}{\Delta\omega}\right) + 10\log\left(\frac{P_{DC}}{1\text{mW}}\right)$$

其中, ω_0 为振荡频率, $L\{\Delta\omega\}$ 为 $\Delta\omega$ 频偏处的相位噪声, P_{DC} 为 VCO 的直流功耗. FOM 越低, 表明 VCO 的性能越好. 在 60.365GHz 和 10MHz 频偏处, 文中设计的 VCO 的 FOM 是 -161.5 .

表 1 给出了相关 VCO 的比较. 在不同的文献里面, FOM 有的取正, 有的取负, 但本质上都是一样的. 为了便于比较, 表中 FOM 统一取绝对值, 绝对值越大, 表明其性能越好.

表 1 中的振荡器都采用 SiGe 工艺, 从各项性能结果来看, 文中设计的 VCO 的直流功耗比文献 [2]、文献 [3] 低很多, 相位噪声性能优于文献 [3] 及文献 [8], 并且有较为适中的 FOM.

表 1 与其他工作频率在 60GHz 附近的振荡器进行比较

频率/GHz	直流功耗/mW	相位噪声/dBc	FOM /dB	文献
45.55~59.45	132	-108@1MHz at 52.5GHz	189.6	[2]
53	252	-58@1MHz at 53GHz	—	[3]
58~60.4	17.5	-93@10MHz at 60.32GHz	156	[8]
58.377~60.365	24.2	-99.77@10MHz, -79.1@1MHz at 60.365GHz	161.5	文中

4 结束语

基于 $0.18\mu\text{m}$ SiGe BiCMOS 工艺,采用传输线构造谐振回路,文中在调谐范围、功耗、相位噪声等方面做了适当的折中,设计了一个交叉耦合差分 VCO,调谐范围为 $58.377\text{GHz}\sim 60.365\text{GHz}$. 仿真结果表明该 VCO 拥有较好的性能,在工作电压为 2.2V ,偏置电流为 11mA 的条件下,在 60.365GHz 和 10MHz 频偏处的相位噪声为 -99.77dBc/Hz , FOM 为 -161.5 .

参考文献:

- [1] Guofu Niu, Zhenrong Jin, John D Cressler. Transistor noise in SiGe HBT RF technology[J]. IEEE JSSC, SEPTEMBER, 2001, 36(9):1424-1427.
- [2] Nakamura T, Hitachi, Kokubunji. A 59GHz push-push VCO with 13.9GHz tuning range using loop-ground transmission line for a full-band 60GHz transceiver[C]// ISSCC, SESSION 29 mm-WAVE CIRCUITS. Beijing, 2009.
- [3] Zhao Yan, Wang Zhigong, Li Wei, et al. Design and measurement of a 53 GHz balanced colpitts oscillator[J]. Journal of semiconductor, 2009, 30(1):1-4.
- [4] Rael J J, Abidi A A. Physical process of phase noise in differential LC oscillator[C]// IEEE 2000 CICC. USA: Florida, 2000:569-572.
- [5] 徐跃, 杨英强. 输入输出调谐的低相位噪声 CMOS 压控振荡器[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(6):50-53.
- [6] 杨丰林, 闵昊, 沈绪榜. CMOS 电感电容压控振荡器中对称噪声滤波技术的研究[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(5):41-44.
- [7] Veenstra H, Notten M G M. 60GHz VCOs with transmission line resonator in a $0.25\mu\text{m}$ SiGe BiCMOS technology [C]// IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. Atlanta, 2008:119-122.
- [8] Ja-Yol Lee, Sang-Heung Lee, Haecheon Kim, et al. A 45-to-60-GHz two-band SiGe:C VCO for millimeter-wave applications[C]// IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. Hawaii, Honolulu, 2007:709-712.
- [9] Jacques Verdier, José Cruz Nune Pérez, Christian Gontrand. Analysis and design of 20GHz VCOs using cross-coupled differential pair and balanced colpitts topologies in SiGe:C BiCMOS technology[C]// International Conference on Design & Technology of Integrated Systems. Nanoscale Era, 2008.

作者简介:

王 东 男, (1984-), 硕士研究生. 研究方向为射频模拟集成电路设计.

吴玉平 男, (1968-), 研究员, 硕士生导师. 研究方向为混合信号集成电路设计技术与方法学.

陈 岚 女, (1968-), 研究员, 博士生导师. 研究方向为超深亚微米芯片设计方法学及计算机体系结构.

(上接第 188 页)

- [4] 张九跃, 焦玉栋. 基于 RBF 神经网络的短时交通流量预测[J]. 山东交通学院学报, 2008, 16(3):32-36.
- [5] Johan Colliez, Franck Dufrenois, Denis Hamad. Optic flow estimation by support vector regression [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2006, 19(7):761-768.
- [6] Kuan-Yu Chen. Forecasting systems reliability based on support vector regression with genetic algorithms[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(4):423-432.
- [7] 甄彤, 范艳峰. 基于支持向量机的企业信用风险评估研

究[J]. 微电子学与计算机, 2003, 23(5):136-139.

- [8] 单莘, 朱永宣, 郭军. 基于支持向量机的网络告警预测知识发现[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(6):35-37.

- [9] 胡佩峰. 交通流量短时预测方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.

作者简介:

李晓斌 男, (1971-), 博士研究生. 研究方向为智能交通、交通诱导.