

# 一种基于 MEMS 的射频低相位噪声 压控振荡器的研制\*

李 丽<sup>1,2,†</sup> 赵正平<sup>1,2</sup> 张志国<sup>1,2</sup> 郭文胜<sup>2</sup> 吕 苗<sup>2</sup> 杨瑞霞<sup>1</sup>

(1 河北工业大学信息工程学院, 天津 300130)  
(2 中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051)

**摘要:** 利用微机械可变电容作为频率调节元件, 制备了一种中心频率为 2GHz 的 LC VCO. 微机械可变电容的控制极板与电容极板分离, 并采用表面微机械工艺制造, 在 2GHz 时的  $Q$  值最高约为 38.462. MEMS VCO 的测试结果表明, 偏离 2.007GHz 的载波频率 100kHz 处的单边带相位噪声为  $-107.5\text{dBc/Hz}$ , 输出功率为  $-13.67\text{dBm}$ . 对微机械可变电容引起的机械热噪声以及减小空气压膜阻尼来降低相位噪声的方法进行了讨论, 提出了一种优化阻尼孔数目的方法.

**关键词:** MEMS; 可变电容;  $Q$  值; 压控振荡器; 相位噪声

**EEACC:** 1230B; 2575F; 2570K

**中图分类号:** TN753.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)05-0900-05

## 1 引言

压控振荡器(VCO)是射频通信系统中非常重要的组成元件之一,它主要应用于锁相环路和频率合成器中来实现精确的参考频率.相位噪声是描述VCO性能的一项重要指标,在频域中表示VCO产生信号的纯度.相位噪声越低,VCO产生信号的纯度就越高.由于LCVCO的相位噪声与其谐振回路的品质因数( $Q$ 值)成反比,所以需要高 $Q$ 值的可变电容和电感.

与目前普遍应用于VCO中的固态变容二极管相比,MEMS可变电容具有低损耗、高 $Q$ 值的优点<sup>[1,2]</sup>.因此,它非常适合应用于VCO中以降低相位噪声.1997年,加利福尼亚大学伯克利分校的Young等人报道集成了两平行板式微机械可变电容的混合集成MEMSVCO<sup>[3]</sup>,其中电感采用片外分立的螺旋电感,中心频率为714MHz,获得的相位噪声是 $-107\text{dBc/Hz}@100\text{kHz}$ .之后,他们报道的MEMSVCO振荡频率不断提高,包括863MHz<sup>[4]</sup>,1.028GHz<sup>[5]</sup>,片外分立电感分别用片上三维电感和键合线电感取代,获得的相位噪声性能都有所降低.1998年,哥伦比亚大学的Dec等人报道集成了三极板式微机械可变电容的MEMSVCO<sup>[6]</sup>,振荡频率为1.35GHz,获得的相位噪声为 $-98.5\text{dBc/Hz}@$

100kHz.于1999年他们又分别报道了1.9GHz<sup>[7]</sup>和2.4GHz<sup>[8]</sup>的MEMSVCO,测试得到的相位噪声分别为 $-98\text{dBc/Hz}@100\text{kHz}$ 和 $-93\text{dBc/Hz}@100\text{kHz}$ .

本文成功地制备出一种集成了电容极板与控制极板分离的微机械可变电容的MEMSVCO.微机械可变电容采用铝表面微机械工艺制作, $S$ 参数测试显示,频率约为2GHz时 $Q$ 值最高为38.462.对降低机械热噪声的方法进行了讨论,提出了利用可变电容瞬态响应时间最短作为标准来优化阻尼孔数目,减小空气压膜阻尼.同时,利用微波薄膜电路工艺制备了VCO有源电路,通过键合技术将MEMS可变电容与电路连接.测试得到当载波频率为2.007GHz时的相位噪声为 $-107.5\text{dBc/Hz}@100\text{kHz}$ ,输出功率为 $-13.67\text{dBm}$ .相位噪声的这一数值为目前报道的有关同频率MEMSVCO的最低数值.

## 2 微机械可变电容

高 $Q$ 值的可变电容是获得低相位噪声VCO的一个关键元件.本文利用铝表面微机械工艺制备了电容极板和控制极板分离的可变电容,图1为其SEM照片.选用铝作为结构材料,是由于其表面电阻低,有利于提高 $Q$ 值.电容极板间的空气间隔为 $2\mu\text{m}$ ,控制极板间的空气间隔为 $3\mu\text{m}$ ,这样理论上可得到的最大调节范围是100%.如果规定最大的调

\* 电子元器件可靠性物理及其应用技术国防科技重点实验室基金资助项目(批准号 51433040204D Z2301)

† 通信作者. Email: lily - 2002 @hotmail.com; lily-zzg @163.com

2005-07-27 收到, 2005-12-04 定稿

节电压为 12V,则所需梁的弹性常数为 21.7N/m. 上极板的质量约为 0.75 $\mu$ g,其机械谐振频率为 27kHz.在运动极板上均匀分布 20 $\mu$ m  $\times$ 10 $\mu$ m 的阻尼孔,孔间距为 20 $\mu$ m,它们一方面用于释放牺牲层,形成悬空结构;另一方面在极板运动时,可以减小空气阻尼.

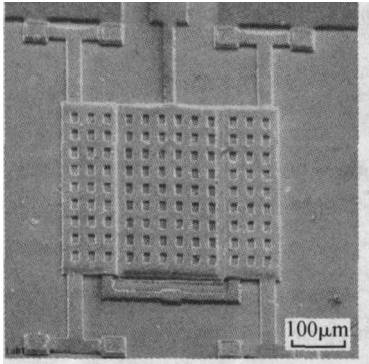


图 1 微机械可变电容的 SEM 照片

Fig. 1 SEM of the fabricated micromachined variable capacitor

使用 HP8510 矢量网络分析仪和微波探针台对可变电容进行  $S$  参数测试,得到用 Smith 圆图表示的回波损耗  $S_{11}$  参数随频率变化的关系,如图 2 所示.利用 Microwave Office 进行参数提取,得到其  $Q$  值随频率的变化关系,如插图所示.随着频率的增大, $Q$  值先呈上升趋势,在频率约为 2GHz 时,出现峰值 38.462,之后  $Q$  值则随频率升高而下降,直到达到其自谐振频率 12.2GHz 时, $Q$  值下降为 0.此微机械可变电容的  $Q$  值达到了硅超突变结变容二极管的  $Q$  值(典型值为 25~40).

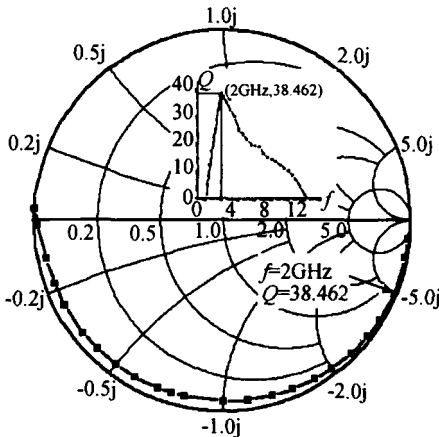


图 2 品质因数 ( $Q$  值) 随频率的变化关系

Fig. 2 Measured quality factor ( $Q$ ) as a function of frequency

### 3 MEMS VCO 电路的制备

一个电调谐 LC VCO 电路主要由三部分组成:

有源器件组成的负阻发生器、LC 谐振回路以及输出匹配电路.负阻发生器通常由场效应管、双极晶体管或 CMOS 晶体管构成,以补偿电路中可变电容和电感的电阻损失,使振荡器维持持续振荡.LC 谐振回路由可变电容和电感的串联或并联组成,它决定 VCO 的振荡频率.

把制备的微机械可变电容和微波薄膜电路工艺制造的电路键合在一起,得到了混合集成的 MEMS VCO 器件,键合线必须尽可能短以减小其电感对电路的影响.图 3 为采用共基电路结构的 MEMS VCO 电路原理图.其中 T1 为双极晶体管,可变电容 C1 与电感 L2, L3 组成并联谐振回路,并通过 C5, C4, R4 反馈到 T1.另外, C2, C6, C3 为电源去耦电容, C7 为输出隔直电容,而 R1, R2, R3, R5 为偏置电阻,为振荡器提供直流偏置.调节这些电阻值,使其静态工作点满足  $I_{cc} = 30\text{mA}$ ,  $V_{cc} = 5.5\text{V}$ . T1 与 L1 一起构成负阻发生器.此电路的振荡频率主要由微机械可变电容 C1,键合线电感 L1, L2, L3 决定.由于键合线电感的  $Q$  值至少比普通螺旋电感高一个数量级,因此在谐振回路中采用键合线电感,有利于提高谐振回路的  $Q$  值,达到降低 VCO 相位噪声的目的.

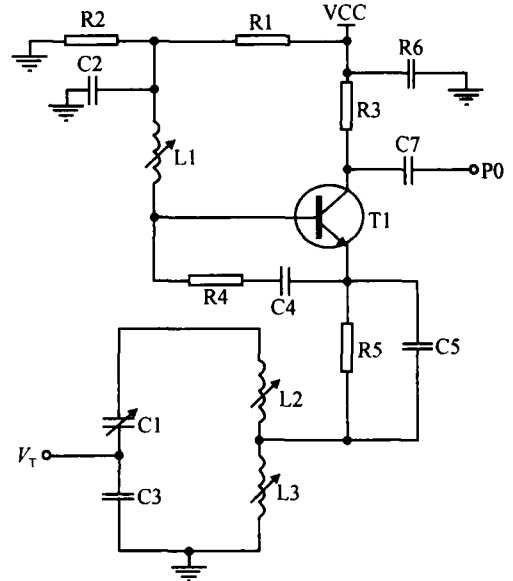


图 3 MEMS VCO 电路图

Fig. 3 Circuit schematic of MEMS VCO

### 4 MEMS VCO 电路的相位噪声讨论

影响 MEMS VCO 电路相位噪声的因素主要包括两个方面:一方面是电路元件引起的电噪声,另一方面是由于引入了微机械可变电容而出现的机械热噪声.目前,对电噪声的来源以及降低方法已有全面的研究<sup>[9]</sup>.但是,对机械热噪声的研究却远不及前

者.因此,有必要对机械热噪声进行深入研究,更有必要找出有效的降低方法.

在微机械可变电容中,运动极板位置的随机变动引起位移的随机变化,从而使可变电容的电容量发生变化,导致 VCO 的输出频率出现脉冲抖动,于是就产生了相位噪声.活动极板产生的位移噪声功率谱密度如(1)式所示:

$$\overline{x_n^2(f)} = \frac{4kTr}{k_m^2 \left[ \left( 1 - \frac{f^2}{f_n^2} \right)^2 + \frac{1}{Q_M^2} \times \frac{f^2}{f_n^2} \right]} \quad (1)$$

在偏离  $f_0$  的载波频率  $f_m$  处,一个微机械可变电容引起的相位噪声如(2)式所示<sup>[3]</sup>:

$$S(f_m) = 10 \lg \left[ \frac{\overline{x_n^2(f_m)}}{8d^2 \left( \frac{1}{1+} \right)^2} \left( \frac{f_0}{f_m} \right)^2 \right] \quad (2)$$

其中  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度;  $r$  表示周围空气的阻尼系数;  $k_m$  为悬臂梁的弹性常数;  $d$  表示未加偏压时极板间的距离;  $\frac{C}{C_0}$  表示可调电容量与寄生电容量之比;  $f_n$  为机械谐振频率;  $Q_M$  为机械品质因数.要降低  $S$ , 可以通过增大  $d$ ,  $k_m$  以及减小  $r$  来实现.但是增大  $d$  会造成获得相同的电容量所需的极板面积增加;增大  $k_m$  则以增大调节电压为代价;而减小空气的压膜阻尼  $r$ , 可以通过在运动极板上增加阻尼孔数目来实现.增加阻尼孔不仅可以减小空气的压膜阻尼  $r$ , 而且在用等离子体干法腐蚀牺牲层时,可以增加气体与牺牲层的接触面积,减小释放时间,减弱等离子体对器件的损伤.可见减小  $r$  是降低机械热噪声最有效的方法.

空气的压膜阻尼  $r$  与可变电容的阻尼孔数目有直接的关系,阻尼孔数目是可变电容的结构参数中需要优化的一个重要参量.这是由于增加阻尼孔虽然可以减小空气阻尼,降低相位噪声,但是会造成响应时间增加,导致 MEMS 可变电容速度变慢.利用平行板电容模型,并假设  $20\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$  大小的阻尼孔均匀地分布在运动极板上,在调节电压为 2V 时,通过求解图 1 所示可变电容的动力学方程得到了响应时间随阻尼孔数目变化的关系,如图 4 所示.由图可见,同一响应时间对应两种不同的阻尼孔数,在达到 A 点之前,由于运动极板没有发生阻尼振荡,所以随着阻尼孔数目的增加,空气阻尼作用逐渐减小,响应时间逐渐减少.在 A 点处,响应时间有一个跳跃,这是由于运动极板发生了振荡,也就是说,阻尼孔的数目有一个临界值,到达此临界值后,运动极板就会发生振荡. B 点之后,随着阻尼孔数目的增加,空气阻尼进一步减小,造成响应时间增加.选取上述第 2 部分可变电容的结构参数,计算得到 A 点的阻尼孔数目为 108 个,此时对应的响应时间最短,所以选取 108 个阻尼孔为最优值.

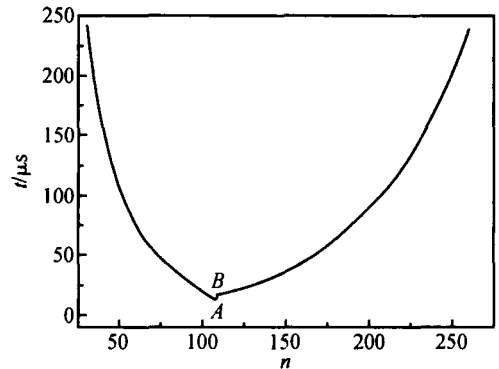


图 4 响应时间与阻尼孔数目之间的关系

Fig. 4 Calculated relation between the response time and the number of damping holes

确定了最优化的阻尼孔数目后,就可以利用相位噪声表达式(1)和(2)来计算微机械可变电容引起的相位噪声.其中  $r$ , 和  $Q_M$  分别为  $1.47 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ , 0.4 和 0.87, 其余各参数值同前.当载波频率为 2 GHz 时,用对数坐标表示的相位噪声  $S$  随频偏  $f_m$  的关系曲线如图 5 所示.从图中可以看出,在机械谐振频率 27 kHz 处,曲线的斜率发生转变,即当频偏小于 27 kHz 时,曲线以  $-20 \text{ dB/dec}$  的速率衰减,而大于 27 kHz 时,曲线以  $-60 \text{ dB/dec}$  的速率衰减.

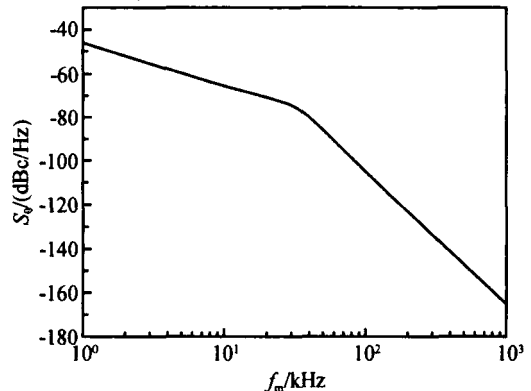


图 5 微机械可变电容引起的相位噪声曲线

Fig. 5 Simulated plot of phase noise resulting from micromachined variable capacitor

## 5 MEMS VCO 的性能分析

相位噪声是描述 MEMS VCO 频谱纯度的一个重要指标,将图 3 中的 P0 输出端接 HP8563E 频谱分析仪,并改变可变电容的调节电压  $V_T$  为 2V,对 MEMS VCO 进行测试,其相位噪声曲线如图 6 所示,在偏移 2.007 GHz 的载波频率 100 kHz 处测得的单边带相位噪声为  $-107.5 \text{ dBc/Hz}$ ,这一数值为目前报道的有关同频率 MEMS VCO 的最低数值.获得低相位噪声是由于采用了高  $Q$  值的微机械可

变电容和键合线电感构成的谐振回路. 由图可见, 当频偏位于微机械可变电容的机械谐振频率 27k Hz 近端时, 相位噪声以 - 20dB/dec 的速率衰减, 而当频偏远离其机械谐振频率时, 以 - 30dB/dec 的速率衰减. 考虑到电噪声的影响, 以及图 5 对机械热噪声的理论计算结果, 可以得出结论: 当频偏位于可变电容机械谐振频率近端时, VCO 中的相位噪声主要是由微机械可变电容的机械热振动造成的, 而当频偏远离机械谐振频率时, 起主要作用的是电路元件引起的电噪声.

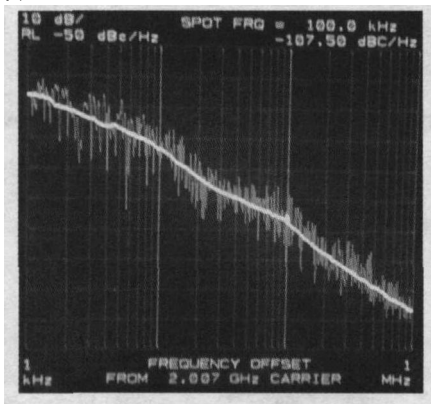


图 6 2GHz MEMS VCO 的相位噪声曲线

Fig. 6 Phase noise plot of 2GHz MEMS VCO

另外, 在相同的测试条件下, 测得其输出功率谱如图 7 所示, MEMS VCO 的输出功率为 - 13. 67dBm. 由图可见, 输出的功率谱纯度很高.

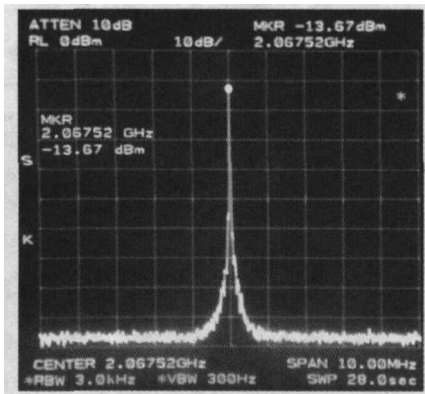


图 7 MEMS VCO 的输出功率谱

Fig. 7 Output power spectrum of MEMS VCO

## 6 结论

本文报道了中心频率为 2GHz 的 MEMS LC VCO,

其谐振回路由控制极板与电容极板分离的微机械可变电容和键合线电感构成. MEMS 可变电容在 2GHz 时的  $Q$  值为 38. 462, 达到了片外分立的硅超突变结变容二极管的性能. 为了降低机械热噪声, 但又不影响可变电容的响应速度, 以其瞬态响应时间最短为标准, 采用动力学方法计算得到最优化的阻尼孔数目为 108. 制备的 MEMS VCO 测试结果表明, 载波频率为 2. 007GHz 时, 单边带相位噪声为 - 107. 5dBc/ Hz @ 100kHz, 输出功率为 - 13. 67dBm. 低相位噪声的 MEMS VCO 为实现高性能的无线通信系统创造了条件.

## 参考文献

[ 1 ] Liang Xuedong, Liu Zewen, Liu Litian, et al. Design and simulation of a high-tuning-range RF MEMS voltage controlled capacitor for RF application. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24 (Supplement): 179 (in Chinese) [梁雪冬, 刘泽文, 刘理天, 等. 高调节范围射频 MEMS 压控电容的设计与模拟. 半导体学报, 2003, 24(增刊): 179]

[ 2 ] Li Li, Zhang Zhiguo, Deng Haili, et al. Research and progress of micromachined variable capacitors. Semiconductor Technology, 2005, 30 (5): 35 (in Chinese) [李丽, 张志国, 邓海丽, 等. 射频微机械可变电容的研究与进展. 半导体技术, 2005, 30(5): 35]

[ 3 ] Young D J, Boser B E. A micromachine-based RF low-noise voltage-controlled oscillator. Technical Digest of Custom Integrated Circuits Conference, Santa Clara, CA, 1997: 431

[ 4 ] Young D J, Mabl V, Ou J J, et al. A low-noise RF voltage-controlled oscillator using on-chip high  $Q$  three-dimensional coil inductors and micromachined variable capacitor. Technical Digest, IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, South Carolina, 1998: 128

[ 5 ] Young D J, Tham J L, Boser B E. A micromachine-based low phase-noise GHz voltage-controlled oscillator for wireless communications. Technical Digest of the 10th International conference on solid-state sensors and actuators, Sendai, Japan, 1999: 1386

[ 6 ] Dec A, Suyama K. Micromachined electro-mechanically tunable capacitors and their applications to RF IC 's. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1998, 46(12): 2587

[ 7 ] Dec A, Suyama K. A 1. 9-GHz CMOS VCO with micromachined electromechanically tunable capacitors. IEEE J Solid-State Circuits, 2000, 35(8): 1231

[ 8 ] Dec A, Suyama K. Microwave MEMS-based voltage-controlled oscillators. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2000, 48(11): 1943

[ 9 ] Leeson D B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum. Proceedings of the IEEE, 1996, 54(2): 329

## Development of a MEMS-Based RF Low-Phase-Noise Voltage Controlled Oscillator \*

Li Li<sup>1,2,†</sup>, Zhao Zhengping<sup>1,2</sup>, Zhang Zhiguo<sup>1,2</sup>, Guo Wensheng<sup>2</sup>,  
L üMiao<sup>2</sup>, and Yang Ruixia<sup>1</sup>

(1 School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

(2 The 13th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** A 2GHz LC VCO is fabricated using a micromachined variable capacitor for frequency tuning. The MEMS variable capacitors, whose controlling plates and capacitor plates are separated, are fabricated in a surface micromachining process. These devices have a quality factor of 38.462 at 2GHz. The MEMS VCO operating at 2.007GHz achieves a single side band phase-noise of -107.5dBc/Hz at a 100kHz offset from the carrier and an output power of -13.67dBm. On the basis of analysis of VCO mechanical-thermal noise produced from the micromachined variable capacitor, a method for lowering the phase noise by reducing the squeeze damping is proposed and an optimized number of damping holes is obtained.

**Key words:** MEMS; variable capacitor; quality factor; VCO; phase noise

**EEACC:** 1230B; 2575F; 2570K

**Article ID:** 0253-4177(2006)05-0900-05

---

\*Project supported by the National Key Laboratory for Reliability Physics and Application Technology of Electronic Components (No. 51433040204D Z2301)

†Corresponding author. Email: lily\_2002@hotmail.com; lily-zzg@163.com

Received 27 July 2005, revised manuscript received 4 December 2005