

文章编号: 2095-4980(2016)05-0820-05

基于 MEMS 方块谐振器的 10 MHz 振荡器

鲍飞鸿, NGUYEN Tan-loc, 李昕熠, 潘明争, 鲍景富

(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要: 方块谐振器的品质因数(Q)很高, 但是插入损耗也很大。为了得到低相噪的微机电系统(MEMS)振荡器, 需要进一步提高方块谐振器的 Q 值, 降低谐振器的插入损耗。通过支撑梁位置的合理设计可以达到极小的锚点损耗, 从而实现非常高的品质因数。采用二阶面切变模态方块谐振器的设计方法, 表现出了很多的优越性: Q 值更高, 动态电阻更小(在间隙为 $0.25\ \mu\text{m}$ 时达到 $82.1\ \Omega$)。基于这种新型谐振器设计出的振荡器实现的相位噪声为: $-156\ \text{dBc/Hz}@1\ \text{kHz}$ 。

关键词: 微机电系统谐振器; 二阶模态; 锚点损耗; 相位噪声

中图分类号: TN753.9

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201605.0820

A 10 MHz oscillator using square MEMS resonator

BAO Feihong, NGUYEN Tan-loc, LI Xinyi, PAN Mingzheng, BAO Jingfu

(School of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: The quality factor of square Micro Electromechanical System(MEMS) resonator is very high, whereas the insertion loss is very big. In order to obtain MEMS oscillator with low phase noise, the quality factor of square resonator is further improved, and the insertion loss is lowered. By reasonable designing, the exact support beam locations can minimize the anchor loss, and the proposed resonator achieves very high quality factor. The design method of Second-Mode Face Shear Square Micromechanical Resonator bears many advantages: higher quality factor and lower dynamic resistance(reaches $82.1\ \Omega$ at $0.25\ \mu\text{m}$ gap). The oscillator based on this newly designed resonator achieves a lower phase noise: $-156\ \text{dBc/Hz}@1\ \text{kHz}$.

Key words: Micro Electromechanical System resonator; second-mode; anchor loss; phase noise

振荡器通常由 2 部分构成: 谐振器和放大器。高 Q 值和高输出功率的谐振器可以改善相位噪声。石英晶体具有很高的 Q 值, 但它的体积过大不利于振荡器的小型化。与之相反, MEMS 谐振器的尺寸通常在微米级别, 且有品质因数高, 体积小, 易与集成电路兼容等优点, 因此在某些领域, 基于 MEMS 技术的谐振器替代晶体就成为可能。在 2003 年, V. Kaajakari 设计了一个外延方形微机械谐振器, 在频率为 $13.1\ \text{MHz}$ 时, 尽管实现了 Q 值超过 130 000, 但动态电阻仍然很小, 只有 $4.47\ \text{k}\Omega$ ^[1], 其相位噪声为 $138\ \text{dBc/Hz}@1\ \text{kHz}$ ^[2]。L. Khine 在 2007 年提出了 $12.9\ \text{MHz}$ Lamé 模态具有不同锚点的方形谐振器, 这种谐振器实现的 Q 值超过 800 000^[3], 其相位噪声为 $132\ \text{dBc/Hz}@1\ \text{kHz}$ ^[4]。为了提高谐振器的品质因数, 在 2010 年, LIN 首次提出了面切变(Face Shear, FS)模态方形谐振器, 谐振频率为 $3.638\ \text{MHz}$, 在空气中的 Q 值为 11 193, 在真空中的 Q 值为 836 283^[5]。

为了实现高 Q 值且低动态电阻的 MEMS 器件, 本文提出了一个 $10\ \text{MHz}$ 基于二阶面切变模态的方块微机械谐振器。首先, 提出了二阶面切变模态方块谐振器的设计, 并用 ANSYS 有限元(Finite Element, FE)仿真得到谐振器的传输响应。通过利用声吸收层来提高品质因数, 优化 Q 值可以达到 750 000。文中还提取了等效电路参数, 计算出等效电阻为 $103\ \Omega$, 利用这个 MEMS 谐振器设计了皮尔斯结构的振荡器, 对电路的振荡器的频率、相位噪声、输出功率等参数进行仿真。

1 二阶面切变模态方块微机械谐振器的设计

之前的文章中提出过二阶面切变模态方块谐振器^[6], 它由一个方形硅盘基底、4 个支撑节点构成。基底的单

边长为 $764\ \mu\text{m}$ ，厚 $25\ \mu\text{m}$ ，它的设计基于硅晶绝缘体(Silicon on Insulator, SOI)工艺。为了激发正确的二阶面切变模态，2 组各有 4 个电极放置在硅盘的角落和边缘中心，一组用于输入信号，一组用于输出信号。在本文中，将支撑梁结构改为 T 型来使谐振器得到更高的 Q 值和更低的动态电阻，所提出的谐振器结构如图 1 所示。

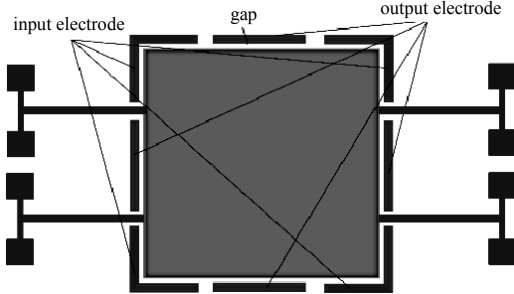


Fig.1 Structure of second-mode FS square resonator
图 1 二阶面切变模态方块谐振器的结构

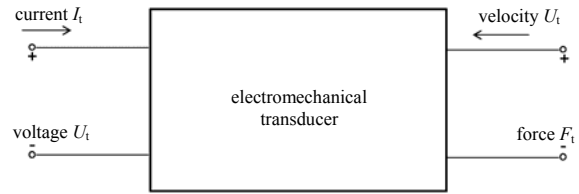


Fig.2 A two-port electromechanical transducer
图 2 二端口机电换能器

当长度与厚度的比值很大时，二阶面切变模态方块谐振器的谐振频率为^[7]：

$$f_0 = \frac{n}{\sqrt{2}L} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1)$$

式中： L 和 ρ 分别是方块谐振器的单边长度和结构材料的密度； n 是谐振模态的阶数；剪切模量 G 为：

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

式中 E 和 ν 分别是谐振器材料的杨氏模量和泊松系数。

该谐振器中方形基底、电极、电极和基底之间的间隙相当于机电换能器系统^[8]，如图 2 所示。

在这种情况下，机电换能器可以转换成横向静电传感器模型，如图 3 所示，由此可得谐振器的等效电路模型如图 4 所示。

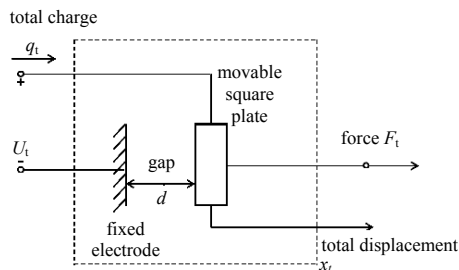


Fig.3 Schematic of a transverse electrostatic transducer
图 3 横向静电传感器模型

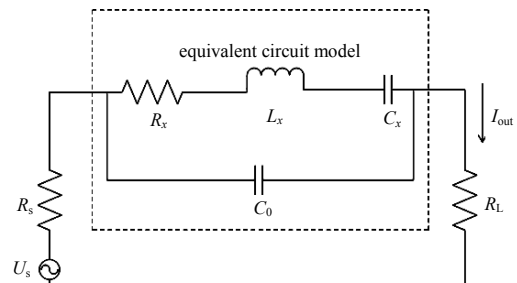


Fig.4 LCR equivalent circuit model of square resonator
图 4 方块谐振器的等效电路模型

等效模型中提取出的有效参数为：

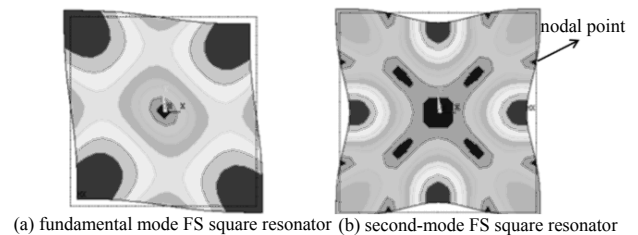
$$L_x = \frac{m_{eq}}{\eta^2}, R_x = \frac{\sqrt{k_{eq} m_{eq}}}{Q\eta^2} = \frac{c_{eq}}{\eta^2}, C_x = \frac{\eta^2}{k_{eq}}, C_0 = \frac{\epsilon_0 h W_e}{d_0} \quad (3)$$

式中： Q, h, k_{eq} 和 m_{eq} 分别是方块谐振器的品质因数、厚度、等效刚度、等效质量； W_e 是输入输出电极的宽度； d_0 是电极和谐振器之间的间隙。式(4)中的 U_p 为谐振器的直流偏置电压，机电转换因子为：

$$\eta = U_p \frac{\partial C_0}{\partial d} \quad (4)$$

2 支撑结构设计

当 MEMS 谐振器在真空中工作时，锚点损耗是影响 Q 值最显著的机械损耗^[9]。因此，需要减少锚点损耗来提高谐振器的 Q 值。在设计中，通过 ANSYS



(a) fundamental mode FS square resonator (b) second-mode FS square resonator
Fig.5 ANSYS FE simulation
图 5 二阶面切变模态方块谐振器在 ANSYS 中仿真

有限元仿真来分析 4 个支撑结构放在节点上和基模中没有出现的情况,如图 5 所示。

另外, T 型支撑结构可以有效地提高 Q 值,降低动态阻抗,图 6 为 T 型支撑结构的仿真图,图 7 为 T 型结构的原理图。

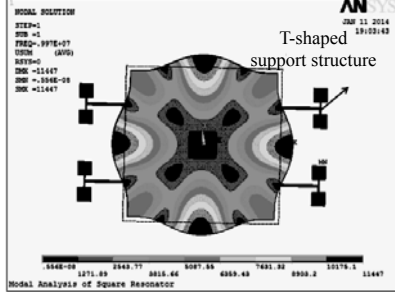


Fig.6 Simulation of T-shaped support structure of the square resonator
图 6 方块谐振器的 T 型支撑结构仿真

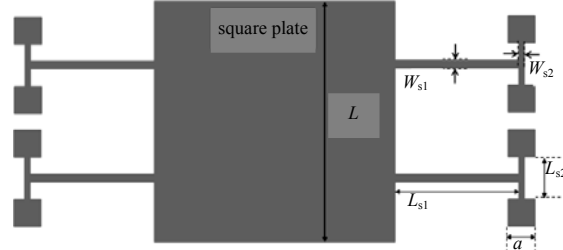


Fig.7 Schematic diagram of T-shaped support structure of square resonator
图 7 方块谐振器支撑结构的原理图

3 模型参数提取

在横向静电传感器^[8]中,机电转换因子可以表示为:

$$\eta = \frac{C_0 U_p}{d_0 + x_0} \quad (5)$$

式中: x_0 是谐振器的偏压位移; C_0 是电极间的静态电容,它可以表示为:

$$C_0 = \epsilon_0 4L_e h / (d_0 + x_0) \quad (6)$$

式中 L_e 是电极的长度。为了提取出等效电路模型的参数,谐振器的设计参数见表 1。

首先利用 ANSYS 有限元仿真得到谐振器的传输响应,然后方块谐振器的 Q 值在直流偏置电压和交流电压驱动下利用声吸收层仿真得到。最后,通过式(3)计算出方块谐振器的等效电路参数如等效电感、等效电容和等效电阻。谐振器的传输函数如图 8 所示。

可以从图 8 中提取出 2 个参数:谐振频率和品质因数。

ANSYS 得到的谐振频率为 9.980 703 MHz, Q 值为 750 000,通过模态仿真得到的方块谐振器关于偏置电压的位移为:

$$x_0 = 0.512 \times 10^{-4} \mu\text{m}.$$

这个微机械谐振器可以用等效电路来建模,因此,谐振器的谐振频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} \quad (7)$$

方块谐振器的等效质量与它的几何结构有关,可以表示为:

$$m_{eq} = \rho h L^2 \quad (8)$$

将提取的参数: Q 值、相移 x_0 , 谐振频率 f_0 代入到公式(3)、(5)~(8)中,可以得到模型的电感 L_x 、电容 C_x 和电阻 R_x 。计算得到静态电容 $C_0 = 2.326 5 \text{ pF}$, 模型电感 $L_x = 0.9819 \text{ nH}$, 模型电容 $C_x = 0.258 97 \text{ fF}$ 和模型电阻 $R_x = 82.1 \Omega$ 。结果表明与之前的模态形式^[1-5]相比,二阶面切变模态方块微机械谐振器在实现了高 Q 值的同时也实现低动态电阻。

表 1 所设谐振器的参数

Table1 Parameters of designed resonator	
parameters	value
resonance frequency, f_0/MHz	10
square plate side length, $L/\mu\text{m}$	764
plate thickness, $h/\mu\text{m}$	25
electrode-to-resonator gap, $d_0/\mu\text{m}$	0.25
square anchor side length, $a/\mu\text{m}$	48
support beam length, $L_{s1}/\mu\text{m}$	190
support beam length, $L_{s2}/\mu\text{m}$	66
support beam width, $W_{s1}/\mu\text{m}$	6
support beam width, $W_{s2}/\mu\text{m}$	3
Young's modulus, E/GPa	150
density of polysilicon, $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 330
DC bias voltage, U_p/V	20

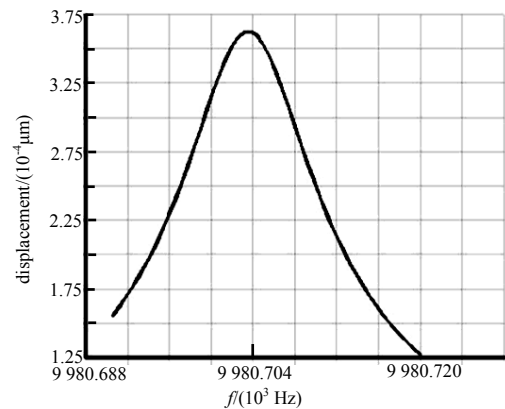


Fig.8 Transmission response of second-mode FS square resonator
图 8 谐振器的传输响应

4 振荡器设计及仿真结果

本文设计的振荡器基于皮尔斯振荡器结构，如图 9 所示。

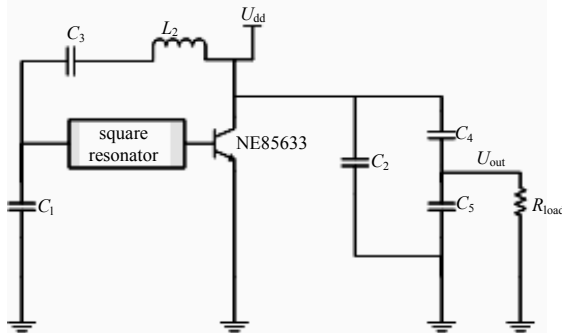


Fig.9 Designed Pierce oscillator using MEMS square resonator
图 9 基于 MEMS 方块谐振器的皮尔斯振荡器的原理图

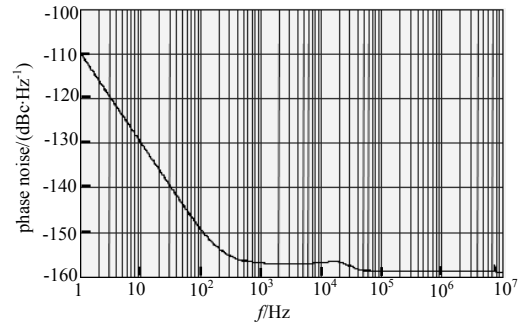


Fig.10 Phase noise performance of MEMS oscillator
图 10 MEMS 振荡器相位噪声的仿真结果

这里的放大器采用了 NEC 公司的 NPN 型硅三极管 NE85633，因为它的噪声系数小，损耗低，增益高。反馈元件 L_2 和 C_3 用来使振荡器满足振荡条件(巴克豪森准则)： $L_2 = 4\,000\text{ nH}$ ， $C_3 = 103.9\text{ pF}$ 。在本设计中，寄生电容来自晶体管、MEMS 谐振器和直流偏置电路，但是皮尔斯振荡器对寄生电容并不敏感。因此， C_1 和 C_2 两个电容可以用来补偿电路中的寄生电容。MEMS 方块谐振器则放在晶体管的基极和集电极之间，信号从集电极输出。使用安捷伦公司的 ADS 软件的谐波平衡进行仿真，相位噪声的仿真结果见图 10，所设计的振荡器相位噪声达到了 $-156\text{ dBc/Hz}@1\text{ kHz}$ 。结果表明，基于二阶面切变模态方块微机械谐振器设计的振荡器相位噪声性能比以前^[2,4]改善了很多。

5 结论

本文主要描述了基于二阶面切变模态方块微机械谐振器的 10 MHz 振荡器的设计。为了实现高 Q 值和低动态电阻，提出了二阶面切变模态方块微机械谐振器，仿真得到 MEMS 谐振器的 Q 值为 750 000，动态电阻为 $82.1\text{ }\Omega$ ，这使得设计出的振荡器相位噪声达到了 $-156\text{ dBc/Hz}@1\text{ kHz}$ ，说明基于 MEMS 谐振器的皮尔斯振荡器结构表现出了非常优越的相位噪声性能。结果表明，二阶面切变模态方块微机械谐振器能够有效改善振荡器相位噪声性能。

参考文献：

- [1] KAAJAKARI V, MATTILA T, OJA A, et al. Square-extensional mode single-crystal silicon micromechanical RF-resonator[C]// in Proceedings of the 12th Int. Conf. on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems. Boston:[s.n.], 2003:951-954.
- [2] KAAJAKARI V, MATTILA T, OJA A, et al. Square-extensional mode single crystal silicon micromechanical resonator for low-phase-noise oscillator applications[J]. IEEE Electron Device Letter, 2004, 25(4):173-175.
- [3] KHINE L, PALANIAPAN M, WONG Wai-kin. 12.9 MHz Lamé-mode differential SOI bulk resonators[C]// International Conference on Solid State Sensors and Actuators-Transducer. [S.l.]:IEEE, 2007:1753-1756.
- [4] NIU Tianfang, PALANIAPAN M. A low phase noise 10 MHz micromechanical Lamé mode bulk oscillator operating in nonlinear region[C]// IEEE Int. Conf. on Frequency Control Symposium(FCS). Newport Beach, CA:[s.n.], 2010:1450-1454.
- [5] LIN ANGEL T-H, YAN J, SESHIA A A. Electrostatically transduced face-shear mode silicon MEMS microresonator[C]// IEEE Int. Conf. on Frequency Control Symposium(FCS). Newport Beach, CA:[s.n.], 2010:534-538.
- [6] NGUYEN Tan-loc, BAO Jingfu, JIANG Junwen, et al. Design and simulation of higher-mode face shear square micromechanical resonators[C]// in Proceeding of Int. Workshop on Microwave and Millimeter Wave, Circuits and System Technology, Chengdu, China:[s.n.], 2013:177-180.
- [7] BHAVE S A, GAO D, MABOUDIAN R, et al. Fully-differential poly-SiC Lamé-mode resonator and checkerboard filter[C]// IEEE Int. Conf. on MEMS, 2005:223-226.
- [8] HARRIE A C, TILMANS. Equivalent circuit representation of electromechanical transducers:I. Lumped-parameter systems[J]. J Micromechanics and Microengineering, 1996, 6(1):157-176.

- [9] JOSHUA E Y LEE, YAN Jize, SESHIA Ashwin A. Study of lateral mode SOI-MEMS resonators for reduced anchor loss[J]. J Micromechanics and Microengineering, 2011, 21(4):1-10.

作者简介:



鲍飞鸿(1991-), 男, 浙江省金华市人, 在读硕士研究生, 研究方向为电路与系统. email: imbaofh@outlook.com.

NGUYEN Tan-loc(1984-), 男, 越南人, 博士, 现为越南胡志明理工大学讲师, 研究方向为电路与系统.

李昕熠(1991-), 男, 浙江省义乌市人, 在读博士研究生, 研究方向为电路与系统.

潘明争(1990-), 男, 安徽省宿州市人, 硕士, 研究方向为电路与系统.

鲍景富(1964-), 男, 浙江省义乌市人, 教授, 主要研究领域为射频电路与系统、射频微机电器件及系统等.

(上接第 819 页)

- [5] 刘刚. 宇航用电子元器件单粒子辐照技术[C]// 第十届全国抗辐射电子学与电磁脉冲学术年会. 沈阳:[s.n.], 2009: 43-46. (LIU Gang. Single particle irradiation technology for aerospace electronic components[C]// Tenth National Anti Radiation Electronics and Electromagnetic Pulse Academic Conference 2009. Shenyang, China:[s.n.], 2009:43-46.)
- [6] 王亮, 岳素格, 孙永姝. 一种单粒子翻转机制及其解决方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012, 10(3):355-358. (WANG Liang, YUE Suge, SUN Yongshu. A kind of mechanism of Single Event Upset and its mitigation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012, 10(3):355-358.)
- [7] LENK R. Practical Design of Power Supplies[M]. [S.l.]: McGRAW-HILL, 1998.
- [8] WANG Liang, LI Yuhong, YUE Suge, et al. Single event effects on hard-by-design latches[C]// 9th European Conference RADECS 2007. Paris: IEEE, 2007:1-4.

作者简介:



魏亚峰(1985-), 男, 西安市人, 主要研究方向为 MOS 器件和混合信号测试技术. email: weiyafeng2004@126.com.

滕 丽(1978-), 女, 重庆市人, 主要研究方向为 MOS 器件和集成电路测试技术.

温显超(1987-), 男, 重庆市人, 主要研究方向为 MOS 器件和混合信号测试技术.

俞 宙(1982-), 男, 西安市人, 主要研究方向为 MOS 器件和混合信号测试技术.