

基于兰姆波压电谐振器的高频低相噪 MEMS 振荡器仿真研究

赵颖, 崔向东

(中国人民解放军军事科学院 系统工程研究院, 北京 100142)

摘要:发达的现代通信设备对时钟源器件提出了更高的要求,在保障频率信号稳定的同时还需要器件具备可集成、微型化等特点,微机电系统(MEMS)振荡器因其具备这些优势,已逐渐替代传统振荡器,成为电子设备中信号源的常用元器件。该文设计了一种 MEMS 振荡器并对其进行仿真测试,该振荡器的核心选频器件由 Lamb 波压电谐振器组成,在应用于振荡电路前,对设计的 MEMS 谐振器进行了仿真测试,并提出两种优化其寄生模式的方法,所得谐振器的品质因数(Q)为 1 357.5,串联谐振频率为 70.384 MHz。将优化后谐振器应用于振荡电路后,对振荡器输出信号和相位噪声进行测试,结果表明, MEMS 振荡器的输出载波频率为 70.58 MHz,相位噪声为 -64.299 dBc/Hz@1 Hz 及 -144.209 dBc/Hz@10 kHz。

关键词:压电谐振器;寄生模式抑制;低相位噪声;微机电系统(MEMS)振荡器

中图分类号:TN384;TN713 **文献标识码:**A

Simulation Study on High-Frequency and Low-Phase-Noise MEMS Oscillator Based on Lamb Wave Piezoelectric Resonator

ZHAO Ying, CUI Xiangdong

(Institute of Systems Engineering, AMS, PLA, Beijing 100142, China)

Abstract: With advancement in modern communication equipment, increasingly higher requirements are placed on clock source devices. These devices must exhibit the characteristics of integration and miniaturization while ensuring frequency signal stability. Microelectromechanical system (MEMS) oscillators, which conform to these requirements, are gradually replacing traditional oscillators as signal sources in electronic equipment. This study entailed the design and simulation of a type of MEMS oscillator wherein the core frequency selection device is composed of a Lamb wave piezoelectric resonator. Prior to its application to an oscillator circuit, the designed MEMS resonator was simulated and tested, and two methods to optimize its parasitic mode were devised. Thus, a Q value of 1 357.5 and series resonance frequency of 70.384 MHz were obtained for the resonator. The optimized resonator was applied to an oscillator circuit, and the output signal and phase noise of the oscillator were tested. Consequently, MEMS oscillators with an output carrier frequency of 70.58 MHz and phase noises of -64.299 dBc/Hz@1 Hz and -144.209 dBc/Hz@10 kHz were obtained.

Key words: piezoelectric resonator; parasitic mode suppression; low phase noise; microelectromechanical system (MEMS) oscillator

0 引言

正常工作的现代通信设备需要高精度的频率信号源为其提供特定频率波段的稳定时钟信号,振荡器是常用的时钟源。振荡器通常可分为 LC 振荡器、RC 振荡器及石英晶体振荡器,其中 RC 振荡器

主要用于产生低频信号,LC 振荡器用于中高频领域,而石英晶体振荡器由于其品质因数(Q)及谐振频率较大的特点,主要用作高频信号源。但与此同时,石英晶振因其体积大、功耗高及难集成等缺点,难以满足现代通信设备在高频应用中系统高集

收稿日期:2023-11-27

作者简介:赵颖(1979-),女,河北省石家庄市人,副研究员,硕士。

成度、小型化等需求^[1]。随着现代科技的进步及通信产业的快速发展,对频率稳定性好、微型化、可集成、低功耗、低相噪的微机电系统(MEMS)振荡器的研究越来越多,该类振荡器结构类似于石英晶体振荡器,但其选频组件由MEMS谐振器组成,因此,在减小振荡器体积的同时还能兼并MEMS谐振器与CMOS可集成、频率稳定度高等优势,成为目前市场上主流的振荡器之一^[2]。

MEMS谐振器主要通过静电或压电进行换能,其中静电换能式谐振器具有超高的品质因数($Q > 1000$),但高频工作时动态阻抗较大,且制作工艺复杂。而压电换能式谐振器高频工作时动态阻抗低,机电耦合系数相对较高,插入损耗小,应用于振荡器时通常无需多级放大,因而所制成的器件体积相对小,工艺成本更低。Gianluca Piazza等^[3]基于一种压电氮化铝(AIN)轮廓模态谐振器制作了一种多频皮尔斯振荡器,能实现单片上4种工作频率的正弦波输出。Sheng-Shian Li等^[4]利用一种带有压电换能臂的硅基谐振器制作了低相位噪声(-150 dBc/Hz@1 MHz)MEMS振荡器。黄继伟等^[5]制作了一种基于薄膜体声波(FBAR)谐振器的超低功耗差分Colpitts振荡器,在电源电压0.6 V下该振荡器功耗仅为83 μ W。随着MEMS压电式谐振器的迅速发展及产业化的实现,基于该类谐振器的MEMS振荡器也广泛应用于卫星导航、计算机、移动通讯、家用电器、军事侦查等领域,用作电子设备的“心脏”部件^[6]。但与此同时,MEMS压电谐振器 Q 值相对较低、寄生模态导致的频率稳定度不高等问题逐渐暴露出来,影响到振荡器输出信号的稳定性^[7]。

本文设计了一种高频兰姆(Lamb)波模态压电AIN谐振器仿真模型,围绕其杂散模态的抑制问题对谐振器结构进行优化,器件激励在Lamb波 S_0 模态工作,通过仿真所得到的器件性能参数构建谐振器等效电路模型,并基于该压电谐振器提出一种高频低相噪的MEMS振荡器。

1 谐振器工作原理

兰姆波作为一种体声波,能在激励波的波长与波导厚度的数量级相当时产生,具有衰减小及传播距离长的特点,本质上相当于二维波,因此,在薄板振动检测中优势较大。但兰姆波具有频散特性,声波会随着频率变化,相速度也会发生改变,从而产

生不必要的振动模态。 S_0 模态在兰姆波谐振器中最常用,其最稳定,在长波极限附近基本不发生色散^[8]。谐振器通常采用叉指电极结构激励产生兰姆波,为了更好地激励 S_0 模态,对叉指电极交替施加极性相反的电压,以使压电层内部电场方向相反,从而产生上下对称的形变,如图1所示。

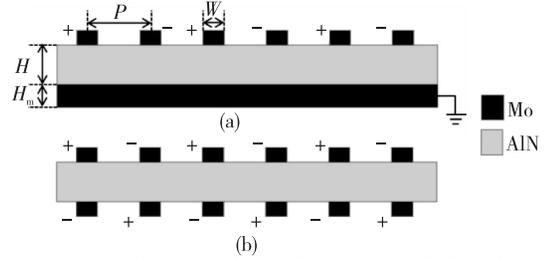


图1 两种激励 S_0 模态兰姆波的电极分布方式

该结构下谐振器主模态的谐振频率 f_s 主要由叉指电极周期 p 及 S_0 模态在长波极限下的波速 c_0 决定,定义:

$$f_s = \frac{c_0}{2p} \quad (1)$$

$$c_0 = 2\sqrt{1 - \frac{1}{\lambda^2}c_s^2} \quad (2)$$

$$\Lambda = \frac{c_1}{c_s} \quad (3)$$

式中: Λ 为波速比; c_s, c_1 分别为压电层中纵波波速和横波波速。

除主模态外,谐振器在振动过程中由于声波传播时的频散特性及压电效应,可能会在主模附近产生无用的寄生模态,这些模态会造成滤波器通带波纹及振荡器输出波形不稳定。当声波在谐振腔内传播至边界处时会来回发生反射,形成与电极对个数相同的驻波,这就是主模,但与此同时部分声波也会在 y 方向的边界处发生反射,从而形成多种形式的寄生模态。此外,由于电极总线处的声阻抗与谐振腔内部存在差异,电极总线附近声波反射也会造成寄生模态的产生。寄生模态的振动强度可用机电耦合系数 k_i^2 来描述,定义:

$$k_i^2 = \frac{\pi^2}{4} \frac{f_p - f_s}{f_p} \quad (4)$$

式中: f_p 为反谐振频率。

对寄生模态的分析通常从能量角度和电场分布来考虑,定义:

$$k_i^2 = \frac{\left(\int_V \mathbf{T} : \mathbf{d} \cdot \mathbf{E} dV \right)^2}{\int_V \mathbf{T} : \mathbf{s}^E : \mathbf{T} dV \int_V \mathbf{E} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^T \cdot \mathbf{E} dV} \quad (5)$$

式中: $\int_V \mathbf{T} : \mathbf{s}^E : \mathbf{T} dV, \int_V \mathbf{E} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^T \cdot \mathbf{E} dV$ 为机械能和静电能的能量密度积分; \mathbf{T} 为应力张量, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{s} 为顺度张量, $\boldsymbol{\varepsilon}^T$ 为介电张量矩阵的转置, V 为电压; $(\int_V \mathbf{T} : \mathbf{d} \cdot \mathbf{E} dV)^2$ 为机械能与静电能相互转换的能量积分。其中每项积分区域为整个谐振腔有效体积。通过优化谐振腔内电场分布情况改变能量转换效率的方式来抑制寄生模式。

声波在 x, y 方向上传播反射后在谐振腔内形成驻波, 需要满足:

$$p = \frac{n}{2} \lambda_x \quad (6)$$

$$L = \frac{m}{2} \lambda_y \quad (7)$$

式中: n, m 为正整数; L 为电极长度; λ_x, λ_y 分别为 x, y 方向的波长。对应的 (n, m) 模式谐振频率为

$$f_{n,m} = c_0 \sqrt{\left(\frac{n}{2p}\right)^2 + \left(\frac{m}{2L}\right)^2} \quad (8)$$

通过改变叉指电极的周期或长度, 也可达到抑制寄生模式产生的目的。

2 谐振器结构设计及有限元仿真

兰姆波压电谐振器采用叉指电极-压电层-板电极结构, 如图 1(a) 所示。电极材料选用金属钼 (Mo), 其具有声阻抗高、低电阻率等优势, 能有效地提高谐振器 Q 值^[9]。压电层选用 AlN, 其声速高, 能够激励高频模式, 且固有损耗较低, 适用于制作高频谐振器与振荡器^[10]。器件整体结构如图 2 所示, 其中支撑锚采用框架-梁混合结构, 具有较小的刚度和振幅, 能有效地降低锚固损耗。压电层厚度 $H = 1 \mu\text{m}$, 叉指电极周期 $p = 62.5 \mu\text{m}$, 电极厚度 $H_m = 200 \text{ nm}$, 电极宽度 $W_e = 25 \mu\text{m}$, 谐振器全长 $L_r = 1\,425 \mu\text{m}$, 电极条长度 $L = 1\,310 \mu\text{m}$, 电极个数 $n = 6$ 。

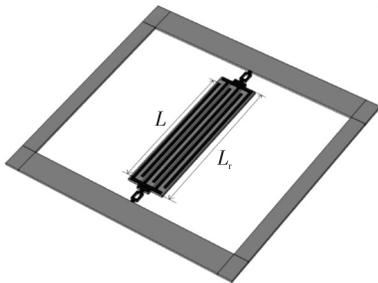


图2 Lamb波谐振器几何结构图

支撑锚宽度为 $30 \mu\text{m}$, 对于支撑锚长度的设计, 当支撑锚的共振频率与谐振体的共振频率相匹配时, 造成的锚损失最为严重, 而对于给定的锚结构宽度 W , 要达到频率匹配, 支撑锚的长度 l 需要满足^[11]:

$$l = \sqrt{\frac{\lambda_i^2 W}{4\pi\sqrt{3} f_0}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (9)$$

$$\lambda_i = (4i + 1) \frac{\pi}{4} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (10)$$

式中: E 为谐振腔杨氏模量; ρ 为密度; f_0 为共振频率; λ_i 为特征模式相关系数。

为了避免支撑锚与谐振腔发生频率匹配, 锚的长度设计需要远小于 L , 通常将支撑锚设定为 $\lambda/4$ (λ 为波长) 的奇数倍, 以达到最大的阻抗失配。因此, 本文将支撑锚长度设定为 $5\lambda/4$ 。该结构下所设计的谐振器有限元仿真主模式振型图及导纳曲线如图 3(a)、(b) 所示。由图 3(a) 可看出, 电极总线附近存在一定程度的振动。由图 3(b) 可看出, 在谐振频率和反谐振频率间存在横向寄生模式, 在反谐振频率附近存在较明显的高阶寄生模式, 导纳曲线中对应的寄生模式振型如图 3(c)、(d) 所示。由图可看出, 需要对谐振器寄生模式进行优化, 以改善谐振器性能。

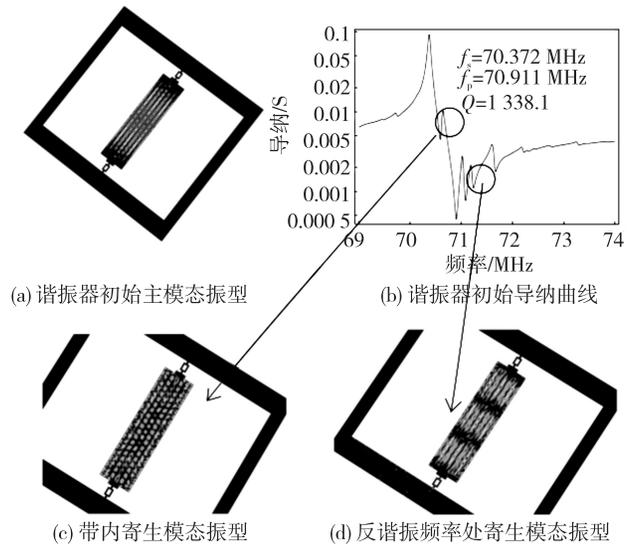


图3 谐振器有限元仿真主模式振型图及导纳曲线

其他结构参数不变, 将电极条长度由 $1\,310 \mu\text{m}$ 增加至 $1\,350 \mu\text{m}$ 时, 仿真所得到的导纳曲线如图 4(a) 所示。由图可看出, 谐振频率和反谐振频率间的寄生模式得到抑制, 但带外寄生模式明显, 这是由于电极条的增长增加了电极覆盖率, 优化了压电层内部电场的分布, 从而使部分寄生模式得到抑制。

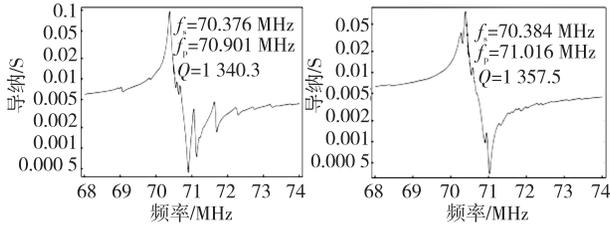


图4 仿真所得到的导纳曲线

(a) 仅改变电极条长度至1 350 μm (b) 在(a)的基础上刻蚀孔隙区后

当进一步对模型的孔隙区(电极条末端与总线之间)进行刻蚀,仿真得到的导纳曲线如图4(b)所示,此时带内和带外的寄生模态均得到了明显的抑制,这是由于孔隙区的刻蚀在y轴方向压电层边界处形成一个空气窗口,压电层与空气存在阻抗失配,兰姆波传播至边界处能够形成更好的反射,从而抑制了反谐振频率附近的寄生模态。上述所提出的两种抑制寄生模态的方法能够在几乎不改变器件谐振频率的情况下使寄生模态得到抑制,最终得到的器件结构如图5所示。



图5 优化后的谐振器三维结构图

3 反馈式振荡器基本原理

振荡器是一种输入信号为0、输出信号为固定频率的系统,通常可分为负阻式振荡器和反馈式振荡器,其中反馈式振荡器工作原理较简单,由放大电路、选频电路、反馈电路及稳幅环节组成。选频电路也可作为反馈电路,而稳幅环节可由放大电路中放大器的非线性特性实现,则反馈式振荡器的简化结构如图6所示。

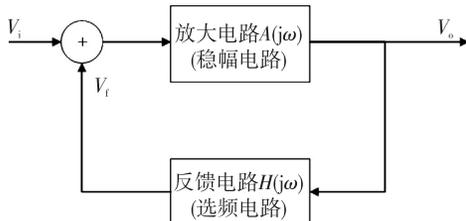


图6 反馈式振荡器系统组成

根据巴克豪森准则,振荡器振荡的平衡条件需

满足:

$$|H(j\omega)A(j\omega)| = 1 \quad (11)$$

$$\angle A(j\omega) + \angle H(j\omega) = 2n\pi \quad (n=1,2,\dots) \quad (12)$$

由式(11)、(12)可知,系统环路增益为1,相角为 $2n\pi$ 时,振荡器才能稳定输出固定频率信号。但仅满足振荡平衡条件还不行,要使振荡器正常起振,还需满足系统刚开始工作时环路增益大于1,相角为 $2n\pi$ 。随着时间的推移,由于放大器的非线性特性,当放大器达到饱和时增益开始衰减,直至减小为1,输出信号不再增大,此时振荡系统达到工作平衡点,持续输出固定频率信号。

相位噪声是衡量振荡器性能的一个重要指标,反映一个理想信号经过一个系统后产生的相位抖动大小^[12]。当信号存在噪声时,可描述为:

$$V(t) = V_0(t) \cos(\omega_0 t + \phi(t)) \quad (13)$$

式中: $V_0(t)$ 为调幅噪声,表示信号电压随时间变化,可通过限制振荡信号电流幅度抑制; $\phi(t)$ 为相位噪声,可定义为偏离载波信号频率 Δf 处1 Hz范围内的单边带噪声功率与信号功率之比,即:

$$\phi(t) = L(\Delta f) = 10 \lg \frac{P_{SS\Delta f}}{P} \quad (14)$$

式中: $P_{SS\Delta f}$ 为偏离载波信号频率 Δf 处1 Hz范围内的单边带噪声功率; P 为载波信号功率。

相位噪声具有随机性,抑制手段差,常通过提高选频网络的Q值来抑制^[13]。因此相位噪声是系统噪声的主要组成成分。

4 MEMS 振荡器设计及仿真

本文设计的振荡器基于反馈式结构,由放大电路和选频电路组成,其中选频电路为MEMS谐振器的双端口等效RLC电路模型,如图7所示。设电容比为

$$\gamma = \left[\left(\frac{f_a}{f_r} \right)^2 - 1 \right]^{-1} \quad (15)$$

则:

$$C_0 = [2\pi f_1 (1 + \gamma^{-1}) \text{Im}(Z_1)]^{-1} \quad (16)$$

$$C_m = C_0 / \gamma \quad (17)$$

$$L_m = \left(\frac{1}{2\pi f_s} \right)^2 / C_m \quad (18)$$

$$R_m = \frac{2\pi f_s L_m}{Q} \quad (19)$$

式中: Z_1 为导纳曲线中远离谐振频率处阻抗; f_a 、 f_r 分别为正、反谐振频率。

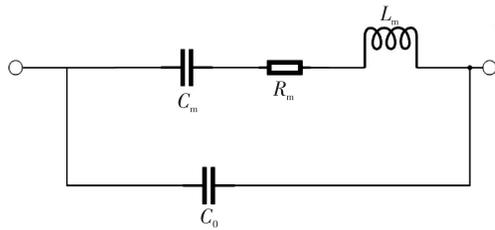


图 7 双端口谐振器等效 RLC 模型

计算得到模型的等效电学参数如表 1 所示。利用 ADS 软件对器件的 S 参数进行仿真,其中 S_{21} 参数反映了谐振器插入损耗,等效 RLC 模型 S_{21} 参数及相位曲线如图 8 所示。由图可知,所设计的谐振器 BVD 模型插入损耗较小,在谐振频率处的相位为 0.3585° ,接近于 0° 。在振荡电路中,将 MEMS 谐振器等效 RLC 模型一端加载到放大器的输入端,另一端与输出端相连接构成闭环正反馈系统,以满足振荡电路起振的增益和相位条件。

表 1 谐振器等效 RLC 模型电学参数

C_0/pF	C_m/pF	L_m/nH	R_m/Ω
14.520 446	0.261 938 0	19 520.629 58	10.392 8

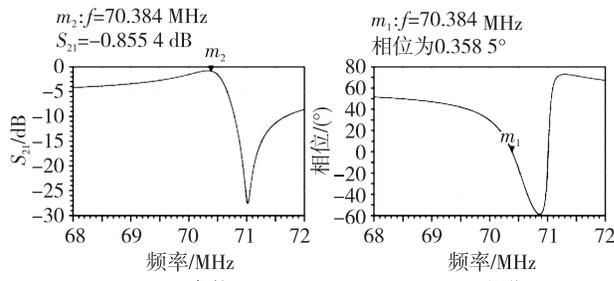


图 8 等效 RLC 模型 S_{21} 参数及相位曲线

放大电路环节采用 NPN 型双极性晶体管 (BJT) 2SC3124,该晶体管截止频率为 1.1 GHz,电流增益带宽达 1 100 MHz,集电极耗散功率低至 0.15 W,能够满足本文的设计要求。图 9 为该放大器共射极接法输出特性曲线。本文选用共射极电压 $V_{CE}=6\text{ V}$,基极电流 $I_{BB}=40\ \mu\text{A}$ 时的工作点。

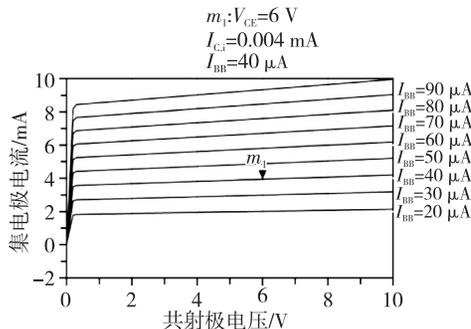


图 9 2SC3124 输出特性曲线

振荡电路的整体原理图如图 10 所示。放大器采用反相共射接法,电阻 $R_1=182.5\text{ k}\Omega$ 、 $R_2=1\text{ k}\Omega$ 、 $R_3=500\ \Omega$ 和 $R_4=13\text{ k}\Omega$ 、 $R_5=1\text{ k}\Omega$ 分别构成一级放大电路和二级放大电路的偏置电阻,使放大器工作在图中所选用的工作点,电容 C_2 为两级放大电路之间的耦合电容, C_5 为电源旁路电容,用于抑制直流电源中的波纹噪声,防止恶化射频输出信号。二级放大电路除满足振荡系统的相位条件外,还能够提高振荡器的带负载能力。同时,为了使输出信号更纯净,波形更平滑,在输出端增加了一级 LC 滤波电路。

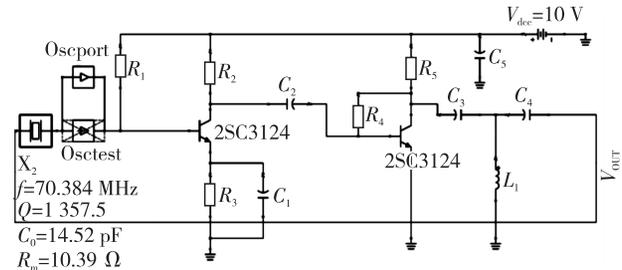


图 10 MEMS 振荡器电路原理图

利用 ADS 中的 Oscitest 控件对振荡系统的起振条件进行测试,得到的 S_{11} 参数仿真结果如图 11 所示。由图可看出,在振荡点 70.38 MHz 附近,闭环增益为 1.004 dB,相位为 -0.763° ,接近于 0° ,因此满足巴克豪森准则中的幅值条件和相位条件。

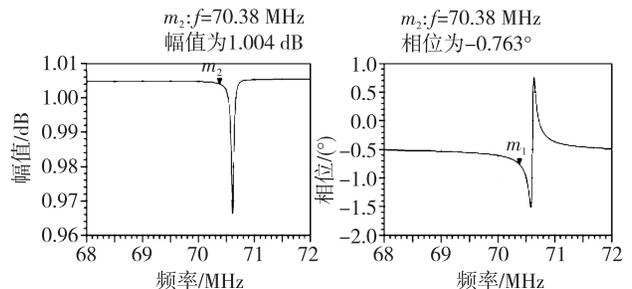


图 11 振荡器起振的幅值和相位条件

对该 MEMS 振荡器的输出信号进行测试,得到如图 12 所示结果,该振荡器输出载波频率为 70.58 MHz,基波输出功率为 -9.103 dBm 。

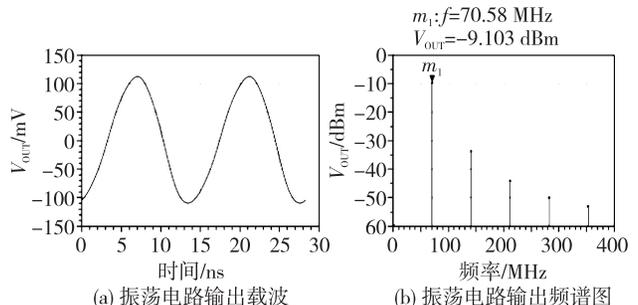


图 12 振荡电路输出载波及输出频谱图

对其调幅噪声和相位噪声进行测试,得出结果如图13及表2所示。由图13及表2可知,该MEMS振荡器调幅噪声达到 $-122.395\text{ dBc/Hz}@1\text{ Hz}$,相位噪声达到 $-64.299\text{ dBc/Hz}@1\text{ Hz}$ 。

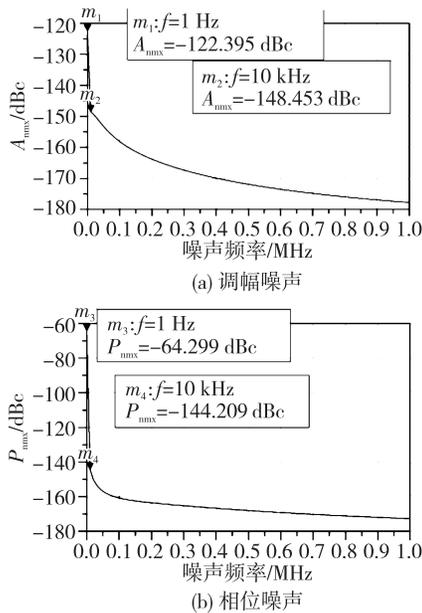


图13 振荡器调幅噪声和相位噪声测试结果

表2 频偏处振荡器调幅噪声及相位噪声值

频偏/Hz	调幅噪声/(dBc · Hz ⁻¹)	相位噪声/(dBc · Hz ⁻¹)
1	-122.395	-64.299
1 × 10 ⁴	-148.453	-144.209
1 × 10 ⁵	-158.096	-160.754
1 × 10 ⁶	-177.723	-172.646

5 结束语

本文提出了一种Lamb波氮化铝压电谐振器,并基于该谐振器设计了一种MEMS振荡器,其中MEMS谐振器激励在Lamb波S₀模态工作,由于Lamb波的频散特性,在谐振频率与反谐振频率之间及反谐振频率附近存在寄生模态,容易影响振荡器输出信号的稳定性及纯净度,因此本文基于电场分布和阻抗匹配的原理提出了两种抑制寄生模态的方法,最终得到Q值为1357.5,串联谐振频率为70.384 MHz,寄生模态得到显著抑制的MEMS谐振器。在MEMS振荡器的设计中,采用反馈式振荡结构,选频器件为所设计的MEMS谐振器,并利用ADS对振荡电路进行仿真测试,最终得到一种输出载波频率为70.58 MHz,相位噪声为 -64.299 dBc/

$\text{Hz}@1\text{ Hz}$,调幅噪声为 $-122.395\text{ dBc/Hz}@1\text{ Hz}$ 的MEMS振荡器。

参考文献:

- [1] 王秋苹. 高频MEMS振荡器性能研究[D]. 成都:电子科技大学,2015.
- [2] HUANG X L Y, DU Y, BAO J, et al. Study of a 10 MHz MEMS oscillator with a TPoS resonator[J]. Sensors and Actuators A:Physical,2017,258:59-67.
- [3] ZUO C, SINHA N, VAN DER SPIEGEL J, et al. Multifrequency pierce oscillators based on piezoelectric AlN contour-mode MEMS technology[J]. Journal of Microelectromechanical Systems,2010,19(3):570-580.
- [4] JENH T, PILLAI G, LIU S I. et al. High-Q support transducer MEMS resonators enabled low-phase-noise oscillators[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2021, 68(4): 1387-1398.
- [5] 黄继伟,童乔. 一种超低功耗低相噪FBAR振荡器[J]. 微电子学,2021,51(4):477-481.
- [6] 韩金瑞. 晶体振荡器的ADS仿真优化与设计实现[D]. 成都:电子科技大学,2012.
- [7] 张一. 新型铌酸锂薄膜基反对称兰姆波谐振器研究[D]. 武汉:武汉大学,2021.
- [8] 张鸿翔. 压电兰姆波谐振器及其声流体效应的理论和应用研究[D]. 天津:天津大学,2018.
- [9] CHEN W, JIA W, XIAO Y, et al. Design, modeling and characterization of high-performance bulk-mode piezoelectric MEMS resonators[J]. Journal of Microelectromechanical Systems,2022,31(3):318-327.
- [10] EISNER S R, CHAPIN C A, LU R, et al. A laterally vibrating lithiumniobate MEMS resonator array operating at 500 °C in air[J]. Sensors,2021,21(1):149.
- [11] CHEN Zeji, WANG Tianyun, JIA Qianqian, et al. A novel Lamé mode RF-MEMS resonator with high quality factor[J]. International Journal of Mechanical Sciences,2021,204:106484.
- [12] WU G, XU J, ZHANG X, et al. Wafer-level vacuum-packaged high-performance AlN-on-SOI piezoelectric resonator for Sub-100 MHz oscillator applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,65(4):3576-3584.
- [13] 汤飞. MEMS振荡器的频率稳定技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2018.