

基于高次谐波体声波谐振器的微波振荡器设计

闫波^{1,2},刘梦伟¹,王文¹,官俊杰¹

(1. 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室,北京 100190;2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:基于高次谐波体声波谐振器(HBAR)的高品质因数(Q)值和多模谐振特性,设计了Colpitts和Pierce两种形式的微波振荡器。采用HBAR与LC元件组成谐振回路的方法,与放大电路构成反馈环路直接基频输出微波频段信号。Colpitts振荡器输出信号频率为980 MHz,信号输出功率为-4.92 dBm,信号相位噪声达-119.64 dBc/Hz@10 kHz;Pierce振荡电路输出信号频率达到2.962 GHz,信号输出功率为-9.77 dBm,信号相位噪声达-112.30 dBc/Hz@10 kHz。

关键词:高次谐波体声波谐振器;微波;振荡器;相位噪声

中图分类号: TN713;TB556

文献标识码: A

DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.001

Design of Microwave Oscillator Based on High-Overtone Bulk Acoustic Resonator

YAN Bo^{1,2}, LIU Mengwei¹, WANG Wen¹, GONG Junjie¹

(1. State Key Lab. of Acoustic Information, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Two types of microwave oscillators, Colpitts and Pierce microwave oscillators, are designed based on the high Q and multi-mode resonant characteristics of high-overtone bulk acoustic resonator (HBAR). The fundamental frequency microwave band signals can be output directly by using HBAR and LC components to consist of feedback oscillating loop with amplifier circuit. The output signal frequency of Colpitts oscillator is 980 MHz with output signal power of -4.92 dBm and phase noise of -119.64 dBc/Hz at 10 kHz offset. And the output signal frequency of the Pierce oscillator circuit is up to 2.962 GHz with output signal power of -9.77 dBm and phase noise of -112.30 dBc/Hz at 10 kHz offset.

Key words: high-overtone bulk acoustic resonator; microwave; oscillator; phase noise

0 引言

随着无线通信技术的快速发展,微波振荡器成为现代电子系统中不可或缺的组成部分,其在导航系统、卫星通信及电子对抗等领域均有重要的应用价值。传统的微波信号源的设计一般是采用石英晶体谐振器在低频下产生振荡(一般为几兆赫~几十兆赫),然后采用倍频法形成高频信号,其缺点是线路复杂、体积大、成本高,同时经过几次倍频后,相位噪声变大。在现代电子设备中对系统性能要求越来越高,而空间却更拥挤,使传统的微波信号源设计面临着严峻的挑战。

高次谐波体声波谐振器(HBAR)^[1]具有高品质因数(Q)值,小体积和多模谐振频谱等特点,在晶体

振荡器中具有最大的 $f \times Q$,可以达到 10^{14} 量级,通常谐振器的Q与其构成振荡器的相位噪声相关,谐振器的Q大,则相位噪声小,故HBAR适合制备低相位噪声的微波信号源^[2-4]。Pang等采用在HBAR基底上集成薄膜体声波谐振器(FBAR)滤波器的方式制备了压控振荡器^[5];Yu等制备的基于HBAR的3.6 GHz振荡器^[6],功耗低,但相位噪声较大;穆晓华等采用HBAR与声表面波(SAW)滤波器级联的方式^[7]产生了2.2 GHz频率信号,系统性能较好,但制备复杂,体积较大。本文采用HBAR与简单LC元件组成谐振回路,然后与放大电路构成反馈环路的方法直接基频输出了微波频段信号。与文献^[5]、^[7]中产生微波信号的方式相比,本文中HBAR微波振荡器具有体积小,相噪低,电路简单

收稿日期:2017-05-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11374327)

作者简介:闫波(1992-),男,山东滨州人,硕士,主要从事微声学器件与信号处理系统的研究。通信作者:刘梦伟(1978-),女,河北秦皇岛人,硕士生导师,主要从事微声学器件及信号处理系统研究。

可靠等优点,有利于现代电子设备朝着高性能和便携式的方向发展,特别适合应用于原子钟中的本地微波振荡器。此外,由于 HBAR 具有多模谐振特性,还可以做成压控振荡器^[8-10]或者在军事通讯中作电子对抗的捷变频微波源。

1 设计

1.1 HBAR 谐振器设计与测试

HBAR 谐振器是采用微机电系统(MEMS)工艺制备的,考虑到双端 HBAR 器件制备的复杂性,设计采用单端 HBAR 器件的形式。单端 HBAR 结构如图 1 所示,由顶电极、压电薄膜和底电极组成的夹心换能器结构和其下的低损耗衬底层构成。HBAR 在外加电场作用下,压电薄膜作厚度方向的伸缩振动,压电薄膜体声波换能器将部分能量注入低损耗的衬底谐振腔中形成驻波,从而产生谐振^[1]。根据文献^[1],HBAR 优化选定的设计结构是100 nmCr-Au/0.6 μmZnO/100 nmCr-Au/400 μmAl₂O₃。

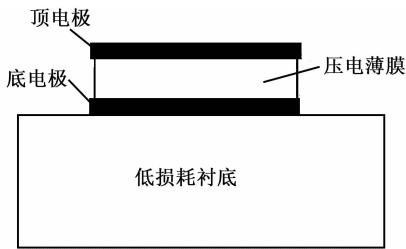


图 1 单端 HBAR 结构原理图

HBAR 本身还是一种多模器件,能在微波频段提供多个高 Q 值谐振点,即 HBAR 具有一系列间隔较近的串、并联谐振频率,该频率间隔近似满足:

$$\Delta f = \frac{v}{2 \times d} \quad (1)$$

式中: v 为基底材料纵波声速; d 为基底材料厚度。本设计中基底采用的 Al₂O₃ (即蓝宝石)厚度为 400 μm,蓝宝石的纵波声速是 11 350 m/s,理论计算值约为 14 MHz。采用安捷伦 E5071C Network Analyzer 对 HBAR 进行测试,其 S₂₁ 特性实测如图 2 所示,由图可知,HBAR 具有多个明显的谐振峰,各模式之间的频率间隔为 13.97 MHz,与理论计算值稍有差异。由于基底的厚度远大于压电薄膜的厚度,故绝大部分能量储存在低损耗基底中,从而保证了 HBAR 器件可以取得高 Q 值。谐振器的 Q 值为

$$Q = \frac{f}{2} \left| \frac{d\varphi Z}{df} \right| \quad (2)$$

式中: f 为谐振频率; φZ 为输入阻抗的相位。经过计算,所用 HBAR 在 2.962 GHz 频率处的 Q 值约为 1.46 × 10⁴。

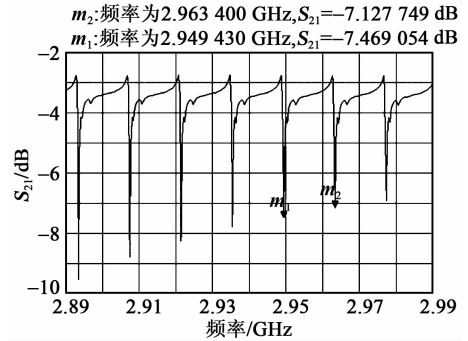


图 2 HBAR 谐振器 S₂₁ 特性

考虑到电路工作频率较高,且 HBAR 谐振器易损坏等因素,将 HBAR 封装于尺寸为 3 mm × 3 mm 的腔体结构中,这样不但保护了 HBAR 基片,增加了 HBAR 的机械性能,又能对射频(RF)场起屏蔽作用。

1.2 HBAR 振荡电路设计

基于 HBAR 设计微波振荡器,首要问题是选择一种合适的电路结构,使电路易于起振,又能达到良好的性能。振荡电路的形式有很多,基于 HBAR 设计了两种基本形式的振荡电路,分别是 Colpitts 振荡电路(见图 3)和 Pierce 振荡电路(见图 4),两种电路形式均采用 HBAR 与 LC 元器件组成谐振回路

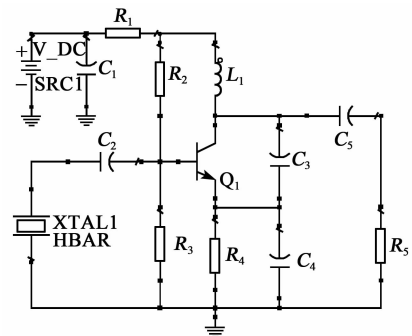


图 3 Colpitts 振荡电路原理图

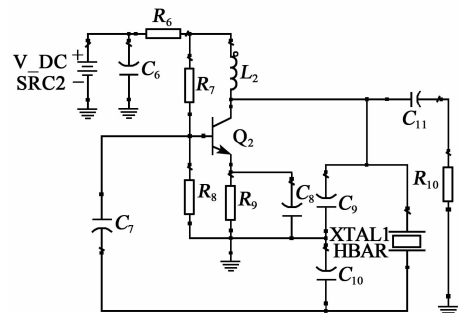


图 4 Pierce 振荡电路原理图

的形式,选用高频低噪声晶体管 2SC4226 作有源器件,其噪声系数仅为 1.2,最高工作频率 4.5 GHz。电路总体结构简单、性能较好。

由图 3 可知,Colpitts 振荡电路是一种串联型的振荡器电路,HBAR 谐振器以低阻抗接入电路。电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 确定三极管的直流工作点, C_2 为基极耦合电容,调谐振荡器回路,当 L_1 、 C_3 、 C_4 的谐振频率等于 HBAR 谐振器的一个谐振点时,HBAR 此时呈现数值不大的电阻,此时反馈最强,满足振荡条件。对于其他频率,HBAR 在反馈回路中呈现一个数值较大的电阻,电路难以起振。

由图 4 可知,Pierce 振荡电路是一种并联型的振荡器电路, R_6 、 R_7 、 R_8 和 R_9 组成偏置电路, L_2 为高频扼流圈,HBAR 和 C_9 、 C_{10} 等电抗元件组成决定频率的并联谐振回路与晶体管放大电路相连构成反馈振荡环路。恰当选取 C_9 、 C_{10} 的比值,更有利于环路起振。从 HBAR 的阻抗频率特性可知,其与并联晶体振荡电路类似,并联型振荡器工作在 HBAR 谐振器的谐振点的串联谐振频率 f_q 与并联谐振频率 f_p 之间的感性区域。

基于 HBAR 设计完成了两种形式的振荡电路原理图,而且完成了 PCB 版图设计,由于电路工作频率较高,PCB 版图需要进行严格的设计。此外,选用优质回路元件,稳压电源,并尽量消除外界干扰等措施,也有助于提高振荡器的性能。

2 结果与讨论

采用安捷伦频谱分析仪 N9320B 对振荡器输出信号进行测试,N9320B 频率测试范围为 9 kHz~3.0 GHz,对信号频谱进行测试,两种振荡器测试频谱如图 5、6 所示,由图 5、6 可知,振荡频率分别为 980 MHz 和 2.962 GHz,输出信号功率分别为 -4.92 dBm 和 -9.77 dBm。

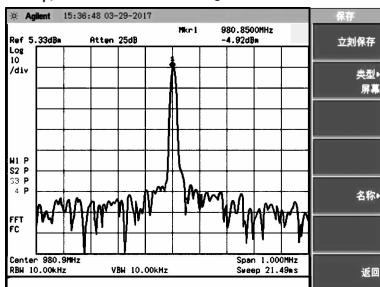


图 5 Colpitts 振荡电路输出频谱图

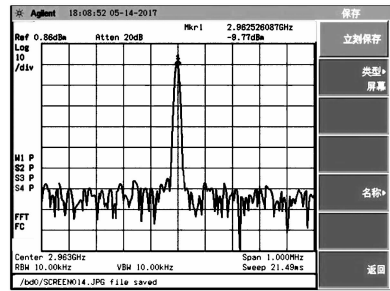


图 6 Pierce 振荡电路输出频谱图

设计中采用简单可靠的电路形式直接基频输出 980 MHz 和 2.962 GHz 频率信号,降低了微波振荡器的电路复杂度。由于射频电路中寄生参数的影响以及 HBAR 的多模谐振特性,会导致振荡电路出现跳频现象,本实验中使用的 HBAR 各模式间的频率间隔较小,易导致跳频现象的发生。一种是可以通过对 HBAR 基底进行打磨的方式,减薄基底厚度,增大谐振频率间隔,来消除此影响,但此方法会导致 HBAR 性能的下降。另外一种方法是通过在蓝宝石基底上集成 FBAR 滤波器的方式来产生单一频率信号。

相位噪声是振荡器的最关键参数之一,决定了振荡器的短期频率稳定度。采用安捷伦 Signal Source Analyzer E5052B(频率测试范围 10 MHz~7 GHz)对振荡器的相位噪声进行测试,结果分别如图 7、8 所示,两种电路在 10 kHz 频偏处的相位噪声

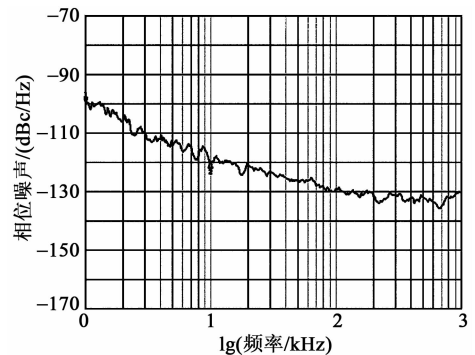


图 7 Colpitts 振荡电路相位噪声图

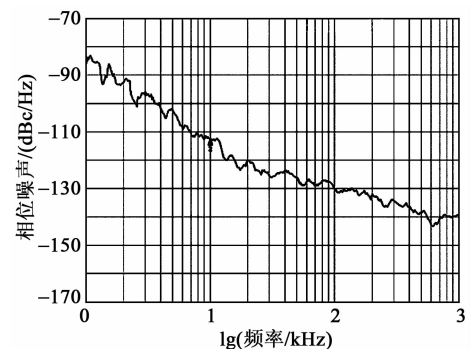


图 8 Pierce 振荡电路相位噪声图

分别达到了 -119.64 dBc/Hz 和 -112.30 dBc/Hz。

该测试结果与文献[6]中的电路设计相比,相位噪声有了较大的提升,但与文献[7]中的结果相比,相位噪声较大。其主要原因是微波频段未进行电路优化设计,PCB 版图设计也存在一定问题,受电路影响较大;其次,由于 HBAR 的封装导致其谐振性能及 Q 值的下降;另外,环路中使用的有源放大元件,以及谐振网络中的电感和电容等元器件 Q 值较低也增加了环路插入损耗,从而增大了相位噪声。后期需针对此进行电路优化。

3 结束语

基于 HBAR 谐振器设计了两形式的的微波振荡器,该振荡器与传统微波振荡器相比具有体积小,电路简单,稳定性好等优点,打破了传统微波信号由低频信号经过倍频的处理方式。电路输出信号频率分别达到了 980 MHz 和 2.962 GHz, 10 kHz 频偏处的相位噪声分别达到 -121.48 dBc/Hz 和 -112.30 dBc/Hz,在雷达和通信等领域将会有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 朱明博,刘梦伟,汪承灏. 基于 ZnO 薄膜的高次谐波体声波谐振器的研究[J]. 应用声学, 2013, 32(3): 212-216.
ZHU Mingbo, LIU Mengwei, WANG Chenghao. Studies of high overtone bulk acoustic resonator with ZnO film[J]. Applied Acoustics, 2013, 32(3): 212-216.
- [2] LI Jian, LIU Mengwei, WANG Chenghao. Resonance spectrum characteristics of effective electromechanical coupling coefficient of high-overtone bulk acoustic resonator[J]. Micromachines, 2016, 7(9):159.
- [3] LIU Mengwei, ZHU Mingbo, LI Junhong, et al. High Q , high frequency, high overtone bulk acoustic resonator with ZnO films[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2013, 14(4): 279-282.
- [4] LEBRASSEUR E, MARTIN G, BARONT, et al. A feedback-loop oscillator stabilized using laterally-coupled-mode narrow-band HBAR filters[C]//S. I. : Ultrasonics Symposium, 2012:1222-1225.
- [5] PANG W, ZHANG H, KIM J J, et al. High Q single-mode high-tone bulk acoustic resonator integrated with surface-micromachined FBAR filter[C]//S. I. : Microwave Symposium Digest, 2005 IEEE MTT-S International, 2015.
- [6] YU H, LEE C Y, PANG Wei, et al. HBAR-Based 3.6 GHz oscillator with low power consumption and low phase noise[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2009, 56(2):400.
- [7] 穆晓华,沈文渊. 基于 HBAR 的 X 波段低相噪频率合成方法[J]. 压电与声光 2015, 37(6):923-925.
MU Xiaohua, SHEN Wenyuan. HBAR-based frequency synthesis at the X band with low phase noise[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(6):923-925.
- [8] 王宗富,郑泽渔,杨正兵,等. 声体波谐振器压控振荡器[J]. 压电与声光, 2011, 33(5):683-686.
WANG Zongfu, ZHENG Zeyu, YANG Zhengbing, et al. VCO with a film bulk acoustic resonator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(5):683-686.
- [9] BALLANDRAS S, BARON T, LEBRASSEUR E, et al. High overtone bulk acoustic resonators; application to resonators, filters and sensors [J]. Acoustics Nantes, 2012.
- [10] KHANNA A P S, GANE E, CHONG T. A 2 GHz voltage tunable FBAR oscillator[J]. Microwave Symp Digest, 2003 IEEE MTT-S International, 2003, 2: 717-720.