doi:10.11887/j.cn.201404021 http://journal.nudt.edu.cn

单层反射模式蓝宝石腔体的9.7GHz频率基准*

单庆晓[1,2], Jean-Michel le Floch[2], 范耀辉[2], Michael Tobar[2]
(1.国防科技大学 机电工程自动化学院,湖南 长沙 410073
2.澳大利亚 西澳大学 物理系,珀斯 WA6009)

摘 要:分析了多层圆柱形蓝宝石腔体谐振器为实现Bragg谐振模式需满足的尺寸条件。仿真并设计了单层腔体,利用teflon支撑件将蓝宝石固定在内部镀银的金属腔体内。其在9.7GHz频点实现了Bragg包含模式,Q值高于200 000。利用该谐振器作为带通滤波器构建了室温下的X波段振荡器。该振荡器还包括低噪放、滤波器和手动移相器。通过合理选择谐振器的插入损耗和调节移相器,该振荡器成功实现了稳定输出。测试结果表明,该振荡器具有低的相位噪声但易受环境温度影响。由于采用了极高Q值的蓝宝石谐振器,该振荡器可能成为目前最低相噪的X波段室温频率基准。

关键词:蓝宝石;频率基准;Bragg模式;X波段
中图分类号:TN919.6 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2014)04-0124-05

9.7GHz oscillator based on single sapphire layer loaded cavity at reflect mode

SHAN Qingxiao[1,2], *Jean-Michel le Floch*[2], *FAN Yaohui*[2], *Michael Tobar*[2]
(1. National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. The University of Western Australia, WA6009, Australia)

Abstract: The dimension condition of multilayer cylinder sapphire-loaded-cavity resonator to meet the requirement of Bragg mode was analyzed. The single layer cavity was simulated and designed and the Teflon support was used to fix the sapphire in the inner-silver-plated cavity. A test showed that the Bragg mode is realized at 9.7GHz and the quality value is greater than 200,000. The Bragg mode is being used as band pass filter to build X band oscillator, which includes low noise amplify, filter and mechanical phase shifter. The oscillator realized stabilization by choosing proper insert loss and adjusting phase shifter. A secibd test showed that the oscillator has low phase noise output and is vulnerable to environment temperature. As ultra high quality value sapphire resonator is being used, the oscillator has the potential to be the state-of-art X band frequency standard with lowest phase noise at room temperature.

Key words: sapphire; frequency standard; reflect mode; X band

蓝宝石是刚玉宝石中除红色外其他颜色刚玉宝石的通称,其主要成分为氧化铝。蓝宝石具有极低的介质损耗,特别是在低温下其介质损耗接近零。将蓝宝石制作成圆柱形放入金属腔体做成谐振器,利用特定的电磁波的腔体模式可获得较大的Q值。将蓝宝石谐振器作为振荡回路的滤波器,可以构建高质量的频率源。低温蓝宝石振荡器在2G~100GHz的短期稳定度是目前所有其他频率源无法比拟的。近年有预测其地位将被光学腔产生的超稳激光所代替,由于光学腔体镜面基底材料存在热波动,限制了短期稳定度的提高,低温蓝宝石振荡器仍处于领先地位[1]。

国外许多机构已研制出低温蓝宝石振荡器,如美国NASA下属的喷气推进实验室为深空探测研究的低温蓝宝石频率源,频率稳定性达10E-14/s[2];法国FEMTO-ST为欧空局研究的低温频率源达到2×10E-15/s[3]。西澳大学物理系2011年为VLBL观测研制的低温频率源达到1×10E-15/s,3.9×10E-16/20s,2×10E-14/s[4]。

目前蓝宝石谐振器主要采用回音壁模式,回音壁模式是一种高阶模式,电磁波沿着晶体内壁传播,就像声波沿着环形墙壁传播一样,从而将电磁波能量高度集中在晶体内。由于常温下蓝宝石具有一定的介质损耗,在常温下采用回音壁模式的蓝宝石谐振器一般只能达到10E5的Q值,而

* **收稿日期**:2013-12-23
基金项目:国家自然科学基金资助项目(11373075)
作者简介:单庆晓(1973—),男,湖南衡东人,副教授,博士, E-mail:tsingxiao@163.com

不是低温下 10E9 的 Q 值。

研究发现,如将蓝宝石材料做成单层或多层空心的圆柱形,将电磁能量集中在内部真空,理论上可以进一步提高 Q 值,从而为构建更低相位噪声频率基准提供可能[5-7]。本文构造一种单层圆柱形蓝宝石结构,利用特弗龙作为支撑件固定在镀银的金属腔体内,由其构建的谐振器将具有获得目前最低相位噪声的可能。

1　单层圆柱形蓝宝石腔体谐振器

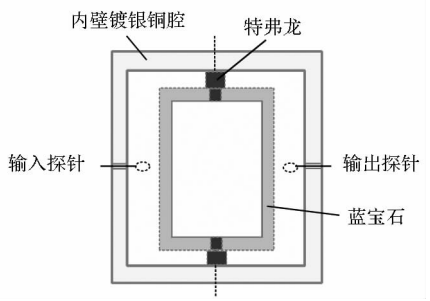
1.1　腔体设计

传统的蓝宝石频率基准基于回音壁模式,该模式下能量主要集中在蓝宝石晶体内部,利用蓝宝石低介质损耗实现较高的 Q 值。由于蓝宝石在室温下介质损耗是存在的,限制了 Q 值的提高。为了降低介质损耗,有学者提出采用多层结构将能量限定在中央的空气区域而不是限定在介质内,这种模式就是反射型模式(也称 Bragg 模式)。反射型模式一般主要为 $TE_{m,n,p}$ 模式,角向分量 $m=0$(n 为径向分量,p 为轴向分量)。这种模式下 E_ϕ 的电场分量与径向和轴向表面均垂直,这是实现 Bragg 反射所需要的。也有采用混合模式的,这种模式下 $m>0$,但仍实现了 Bragg 反射和能量限定[5]。

本文设计了一种空心圆柱形蓝宝石结构,其轴向剖面图如图 1(a)所示。该结构包括一个空心环和上下两个圆盘盖。上下盖利用 teflon 材料做成的支柱进行支撑。Teflon 材料具有较低的介质损耗,且易于加工。外部腔体材料为铜。为了降低电阻率,铜的内表面镀了一层银。电磁信号从腔体约 1/2 高度的位置输入,右侧同样的位置输出。穿透响应 S21 在某个谐振点达到最大的 Q 值,利用该 Q 值点可以作为振荡器的滤波器。

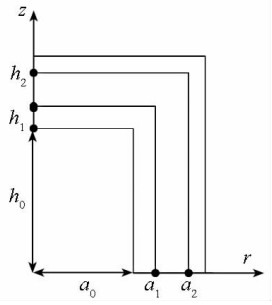
在设计蓝宝石腔体谐振器时,关键在于其几何尺寸的确定。图 1(b)为该单层结构的轴向剖面的四分之一图,a 为径向尺寸,h 为轴向尺寸。其中 a_1 为内空半径,a_2 为蓝宝石径向层厚,h_1 为蓝宝石层与金属腔体内壁的径向间隔,h_2 为内空半高。h_3 为蓝宝石轴向层厚,为蓝宝石层与金属腔体内壁的轴向间隔。

从轴向分析可将金属腔内部空间分为主谐振区和反射区。主谐振区为蓝宝石的中空区域,而反射区则为蓝宝石层及其与金属腔内壁之间的区域。因此反射区分为两层,有着不同的介电常数。假设电磁模式为横电模式,那么在轴向则是正弦分布,在径向则是贝塞尔函数分布[8]。在最简模式下,如假设轴向和径向完全隔离互不影响,则要求在 $z=h_0$ 和 $z=h_0+h_1+h_2$ 处 E_ϕ 为零。



(a)腔体轴向剖面

(a) Schematic of cylindrical structure



(b)轴向与径向尺寸分布

(b) Dimension distribution at axial and radial direction

图 1　腔体设计

Fig. 1　Cavity design

电磁波在轴向传播为正弦波分布,可以得到以下约束条件

$$k_{zi}h_i=\frac{\pi}{2},\ i=0,\ 1,\ 2$$

k_{zi} 为第 i 层正弦波整波长的数量

由于反射区构成一种反谐振模式,因此轴向和径向的完全独立考虑是不符合实际的。文献[8]提出该模式下必须考虑腔体宽高比的影响,因此假设

$$k_{z2}=\gamma\cdot k_{z0}$$

$$k_{z1}=\sqrt{\varepsilon_r}\cdot k_{z2}$$

γ 为定义的比例系数,ε_r 为蓝宝石的介电常数。

利用自编的设计软件,我们设定了正弦波的整波长数,设定边界条件,得到具体的尺寸如下:(单位:mm)

$$a_1=21.05,\ a_2=3.3,\ a_3=6.1$$

$$h_1=15.5,\ h_2=2.8,\ h_3=7.15$$

根据该尺寸,研制的腔体实物如图 2 所示。

1.2　仿真与测试

为了描述 Bragg 模式能量的包含情况,定义了包含因子

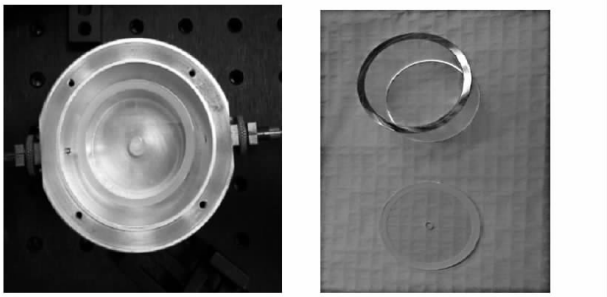


图 2 腔体实物图

Fig. 2 Photo of the cavity

$$pe_i = \frac{\iiint \varepsilon_i |E|^2 \mathrm{d}V_{media}}{\iiint \varepsilon |E|^2 \mathrm{d}V_{total}} \quad (2)$$

pe_i 表示了腔体内某部分空间 i 包含电磁能量占腔体内全部电磁能量的比。

对图 2 的腔体进行仿真,结果显示在 fr = 9.7763GHz 处获得较好的能量包含。其电磁场分布如图 3 所示,可见此时谐振能量主要集中在中空区域。

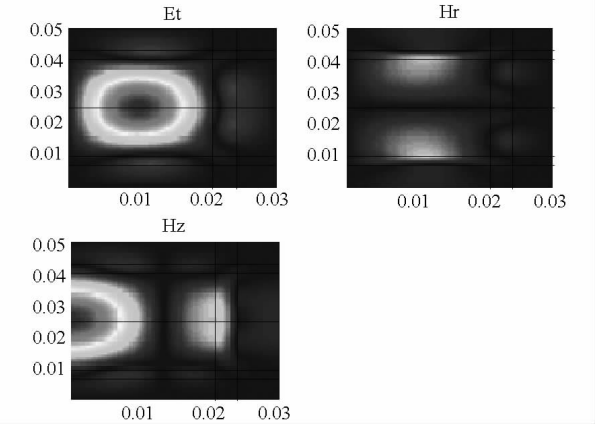


图 3 Bragg 电磁模式

Fig. 3 Bragg resonate mode

该腔体考虑输入输出探针时其带载 Q 值定义为 Q_L

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_{ext1}} + \frac{1}{Q_{ext2}} + \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{Q_{Sapphire}} \quad (1)$$

其中:

Q_{ext1}:探针 1 耦合 Q 值;

Q_{ext2}:探针 2 耦合 Q 值;

Q_m:金属腔体损耗 Q 值;

$Q_{Sapphire}$:蓝宝石损耗 Q 值。

在 fr = 9.7763GHz 处对考虑各种损耗下的 Q 值进行计算,并对蓝宝石介质及内部中空区域的包含因子进行计算,结果如表 1 所示。可见内部中空区域包含了 81% 的能量。

表 1 仿真结果

Tab. 1 Simulation result

频率	f_0	9.776 370 488 885 082e +009
蓝宝石介质损耗	$Q_{Sapphire}$	7.199 738 328 648 488e +005
腔体内边壁	Q_{mside}	4.591 927 719 126 316e +005
腔体上下壁	Q_{mTB}	1.592 683 686 098 968e +006
蓝宝石的包含因子	$pe_{sapphire}$	0.19
空气的包含因子	pe_{air}	0.81
无探针	Q_0	2.384 048 773 071 789e +005

将蓝宝石清洁后组装好,利用 Agilent N9918A 网络分析仪测试 S21 的穿透响应。采用环形探头,利用外部调节机构调节伸入长度。当伸入长度越大,耦合强度就越大,测得的 Q 值越稳定,但 Q 值越低,这是环形探头带来的损耗导致的。对各谐振点进行大致的测试,得到的 Q 值与频率的关系如表 2 所示。根据仿真的结果,在 9.7GHz 附近进行仔细搜索,并减少探头伸入长度,降低插入损耗。在 9.741GHz 附近得到 234 460 的 Q 值。经反复测试,确认该模式稳定存在,为预期设计的 Bragg 模式。

表 2 实测 Q 值与插入损耗

Tab. 2 Q value and insert loss test result

频率(MHz)	Q 值	插入损耗(dB)
9178.064	39 068	-36.17
9720.048	65 436	-35.74
9741.145	234 460	-55.00
10 108.616	9121	-41.29
10 234.000	37 034	-33.59
10416	59 502	-32.78
11348	7103	-36.23
11622	60 971	-43.27

利用网络分析仪测试结果如图 4 所示。实测中心频率为 9.741 145 060GHz,Q 值为 234460,插入损耗为 -55dB。增大显示频率带宽,当显示带宽为 500MHz 时,如图 4 右所示,其中心频率附近比较平坦,没有其他的高 Q 模式。而传统的回音壁模式常具有大量的寄生模式,作为滤波时需要进行复杂的预处理。因此腔体在 Bragg 模式下非

常适用于作为振荡器中的滤波器件。

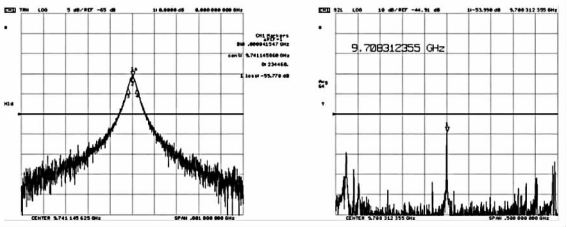


图 4　实测波形

Fig. 4　Test result of network anlyze

2　振荡环路

根据满足振荡器需要的 Barkhausen 条件[9],利用蓝宝石腔体谐振器构建了振荡电路。由于谐振器具有多个高 Q 值点,为了确保振荡电路工作在设定的 Bragg 模式,采用了一个带通滤波器加入在振荡回路中。实验室的带通滤波器的带宽为 9.5G ~ 9.7GHz,其在 9.74GHz 处仍有一定通过能力。

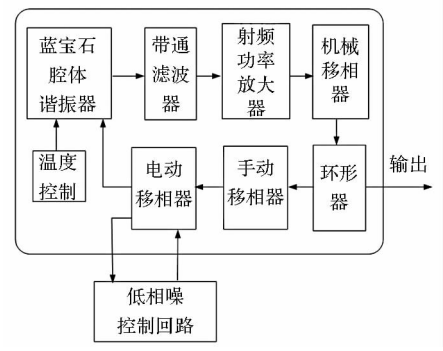


图 5　振荡器回路

Fig. 5　Schematic of oscillator loop

振荡回路包括 GaN 低相噪功率放大器、带通滤波器、电动移相器、机械调相器、蓝宝石腔体、环行器组成振荡回路,如图 5 所示。功率放大器的增益为 35dB,考虑到各环节的损耗,调节探头损耗在 32dB 左右。低相噪控制回路对输出信号进行相干处理,再通过电动调相器对相位进行微调。通常低相噪控制回路可至少降低相位噪声 10dB。在本次实验中尚未加入低相噪控制回路。

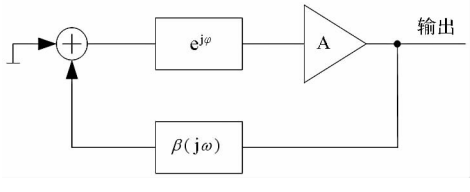


图 6　振荡回路的简化框图

Fig. 6　Simplified schematic of oscillator loop

该振荡回路的简化框图如图 6 所示,其中 A 为环路增益,$e^{j\varphi}$ 表示环路引入的相移,$\beta(j\omega)$ 表示滤波器函数。在不考虑环路引入相移情况下,只有当满足以下条件振荡电路才能起振。

$$|A\beta(j\omega)| = 1$$

$$\arg A\beta(j\omega) = 0$$

为了能让振荡电路在选定频率点起振,手动调相器的加入是必要的。设手动调相器引入的相位延迟为 φ,则 Barkhausen 相位条件式变为

$$\arg A\beta(j\omega) + \varphi = 0$$

设谐振频率为 ω_n,实际振荡频率为 ω_0,则有

$$\omega_0 = \omega_n + \Delta\omega$$

$\Delta\omega$ 为由于相位延迟导致的频率差,$\Delta\omega = -\dfrac{\varphi}{\mathrm{d}[\arg A\beta(j\omega)]/\mathrm{d}\omega}$。

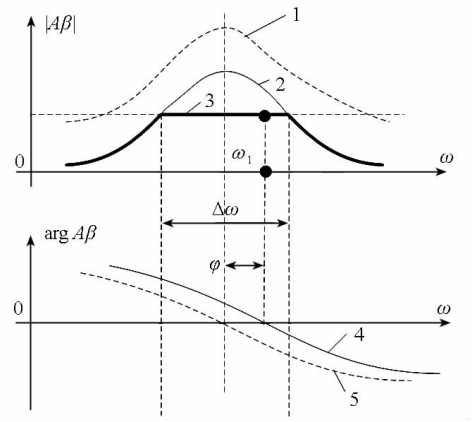


图 7　调节相位来实现频率微调

Fig. 7　Tuning the oscillator frequency by adjusting phase shift

在起振过程中,首先是噪声产生在 $|A\beta| > 1$ 的频带范围内的微弱信号得到放大,如图 7 曲线 1 所示。随着信号进入正反馈,信号功率逐渐增大,放大系数逐渐降低。当信号超过一定幅值后放大器饱和,使得放大倍数等于 1,如图 7 曲线 3 所示,此时频率调节范围为 $\Delta\omega$。在振荡过程中,还必须满足相位条件。由于振荡环路包含射频连接器、同轴馈线这些难以精确测量相移的器件,因此加入手动调相器,通过手工调节使之满足相位条件起振。图 7 中当相位调节量为 φ 时,振荡环路的相频曲线由 5 移至 4,此时对应的振荡角频率为 ω_1。

搭建了振荡器后,调节手动调相器实现了振荡回路起振。在频谱分析仪上观察到了 9.74GHz 附近的输出频率,得到的输出频谱如图 8 所示,其输出频谱稳定,中心频率 3dB 带宽为 2kHz,10kHz 带宽外的噪声接近频谱仪的背景噪声。

在测试过程中,由于 Bragg 模式的腔体对温度较为敏感,在测试过程中,发现其中心频率在不

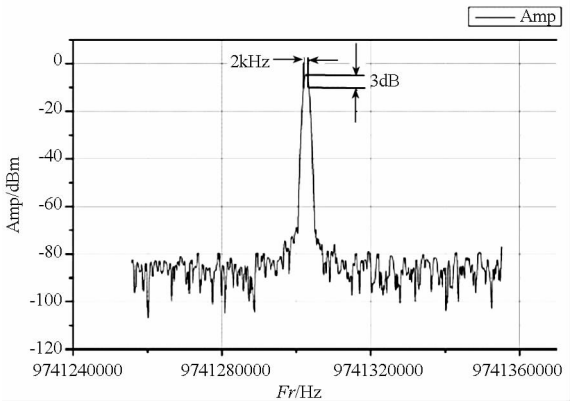


图8 频谱分析仪测试波形

Fig. 8 Output spectrum

断漂移,频率漂移率约为0.2697ppm/s,其频率漂移如图9所示。

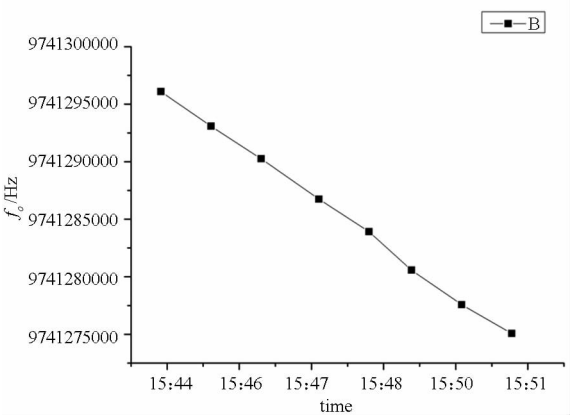


图9 蓝宝石振荡器的频率漂移

Fig. 9 Oscillator frequency drift

由于Bragg模式蓝宝石谐振器在X波段具有极高的Q值,用频谱分析仪难以测得其相位噪声,下一步拟采用相位桥的方式对其相位噪声进行测试。相位桥的方式可将相位的波动变换到幅度的波动,可直接在实时FFT设备上进行测试。

为了克服Bragg振荡器的环境敏感性,下一步拟开展恒温和真空环境下的测试。

3 结语

利用Bragg模式具有常温下Q值较高的特点,成功研制了单层反射型蓝宝石谐振器,测试结果表明,该谐振器在9.7GHz处工作在Bragg模式。利用该谐振器作为带通滤波器构建了X波段振荡器,测试结果表明,该振荡器可以稳定工作,但其易受环境的影响。相关研究工作正在进展中。由于其Q值和频率的乘积远高于目前广泛使用的石英晶体振荡器,因此这是一种极具前景的X波段频率基准。

参考文献(References)

[1] Locke C R, Ivanov E N, Hartnett J G, et al. Design techniques and noise properties of ultrastable cryogenically cooled sapphire-dielectric resonator oscillators[J]. Review of Scientic Instruments, 2008, 79:051201.

[2] Dick G. J, Wang R T. Cryo-cooled sapphire oscillator operating above 35K[C]//Proc. 2000 Int. IEEE Freq. Contr. Symp., 2000:480-484.

[3] Grop S, Bourgeois P Y, Bazin N, et al. ELISA: A cryocooled 10 GHz oscillator with 10 frequency stability[J]. Rev. Sci. Instrum., 2010, 81:025102.

[4] Hartnett J G, Nand N R. Ultro-Low Vibration pulse-tube cryocooler stabilized cryogenic sapphire oscillator with 10-16 fractional frequency stability[J]. IEEE trans on Microwave and techniques, 2010,58(2): 3580-3586.

[5] LeFloch J M, Tobar M E, Mouneyrac D. Discovery of bragg confined hybrid modes with high Q factor in a hollow dielectric resonator[J]. Applied Physics letters, 2007, 91: 1-3.

[6] Tobar M E, LeFloch J M, Cros D, et al. Spherical Bragg reflector resonators[J]. IEEE Trans on UFFC, 2004,51(9): 1054-1059.

[7] Krupka J, Tobar M E, Hartnett J G, et al. Extremely high-Q factor dielectric resonators for millimeter-wave application[J]. IEEE Trans on Microwave theory and Technique, 2005, 53(2): 702-712.

[8] Tobar M E. LeFloch JM, Cros D, et al. Distributed bragg reflector resonators with cylindrical symmetry and extremely high Q-factors[J]. IEEE Trans on UFFC, 2005, 52(1): 17-26.

[9] Rubiola E. Phase noise and frequency stability[M]. Cambridge University Press,2009.