文章编号:1001-5078(2013)03-0240-04　　·综述与评论·

复合腔及其在激光技术中的应用

王　新,肖光宗,谢元平
(国防科技大学光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘　要:介绍了复合腔的定义及分类,总结了复合腔在调频纵模选择、光反馈测量和双频或双波长输出方面的应用和相应结构特点及近年来的发展,并结合应用背景对不同复合腔的特点做了比较。介绍了本实验室新研制的新型 Y 型腔双频 He - Ne 激光器,其频差动态范围可以达到从 26 ~ 665 MHz 的宽频率范围输出。介绍了基于上述激光器研制的气体膜盒式双 Y 型腔双频激光加速度计,经理论计算加速度计的分辨率可以达到 1.15×10^{-6} g。

关键词:复合腔;双频 He - Ne 激光器;激光加速度计
中图分类号:TN243　　**文献标识码:**A　　**DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.03.002

Compound-cavity and its application in laser technology

WANG Xin, XIAO Guang-zong, XIE Yuan-ping
(Department of Optoelectronic Engineering, College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The definition and the classification of compound-cavity are introduced in this paper. It is also introduced the application of compound-cavity in tunable longitudinal-mode-selection, in measurement based on the optical feedback effect and in dual-frequency or dual-wavelength laser output. Relevant developments to this day are summarized. According to the characteristics of different applications, the losses in different compound-cavities are analyzed. It is introduced a new dual-frequency He-Ne laser with a Y-shaped cavity, which can produce different frequency ranging from 26 to 665 MHz. And a novel dual frequency laser accelerometer with double Y-shaped cavity and gas sylphon is also demonstrated. Theoretical analysis proves that the resolution of the accelerometer can reach up to 1.15×10^{-6} g.

Key words: compound-cavity; dual-frequency He-Ne laser; laser accelerometer

1　复合腔

复合腔是一种特殊的光学谐振腔,它是相对于简单腔而言的。简单腔是指只存在一条光传播路径的谐振腔,F - P 腔就是典型的简单腔。不同于简单腔,复合腔具有两条或两条以上的光学传输路径,并且它们又具有共用的部分,不同的光传输谐振腔被叫做“子谐振腔”,简称“子腔”,一个复合腔由多个子腔构成。按光的传播路径在方向上是否发生分离,复合腔又可以被分为“同向复合腔”和“分叉复合腔”。

2　几种典型复合腔及其应用

2.1　干涉仪式复合腔

将简单腔的一个反射镜用一组反射干涉仪所代替,就组成了一个干涉仪式复合腔,其常被用于实现激光器的单纵模或可调谐输出。反射干涉仪的反射率将变为光频率的函数,改变子谐振腔的腔长可以实现输出频率的调谐。当选择合适的子腔腔长使激光频率间隔大于增益线宽时,就可以实现激光器的单模运转。迈克尔逊干涉仪式复合腔[1](如图 1 所示)和福克斯 - 史密斯干涉仪式复合腔[2](如图 2 所示)是这种复合腔的两种代表。

基金项目:国防科技大学优秀研究生创新项目(No. B090703);湖南省研究生科研创新项目(No. CX2010B036)资助。
作者简介:王　新(1987 -),男,硕士,主要从事激光器及光电检测方面研究。E-mail:wangxtju@126.com
收稿日期:2012-07-24;**修订日期:**2012-08-27

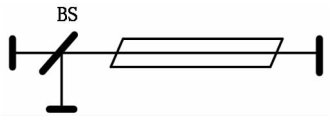

图 1　Michelson 干涉仪式复合腔

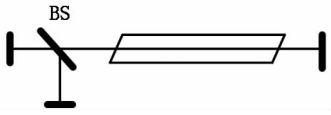

图 2　Fox-Smith 干涉仪式复合腔

1962 年,由 D. A. Kleinman 和 P. P. Kisliuk 首次提出在激光腔外加一反射镜构成 F－P 腔来选择纵模[3]。同年,H. Kogelnik 和 C. K. N. Patel 两位科学家利用 He－Ne 激光器第一次实践了这种方法[4]。

复合腔的调频、选模作用在光纤激光器上也得到了很好的应用。1996 年,Jianluo Zhang 和 Chaoyu Yue 开始采用双光纤环的复合腔结构(如图 3 所示)替代传统方法使用的光纤光栅和光纤 F－P(FFP)滤波器实现光纤激光器可调频,单纵模运转,可调谐范围达到从 1525 ~ 1570nm,峰值输出功率达到 20 mW[5]。

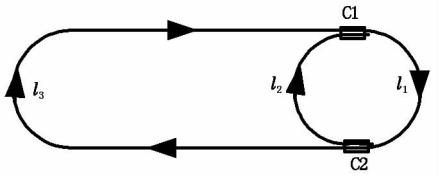

图 3　双光纤环复合腔结构

2008 年,C. H. Yeh 和 T. T. Huang 报道了利用三个光纤环代替 F－P 腔作为滤波器的单纵模可调频复合腔光纤激光器,波长可调谐范围从 1481 ~ 1513 nm,输出功率变化小于 0.05 dB,波长变化小于 0.02 nm,边模抑制比高于 54.3 dB/0.05 nm[6]。

2.2　光反馈弱复合腔

如果复合腔的一个子腔由于腔镜反射率的限制不能实现激光输出,而该子腔产生的较弱的反射光却能在共同端与另一子腔产生的光场相互耦合,使该激光光场的光强、模式和偏振等参量发生改变,这种复合腔被称为弱复合腔。其中,产生激光输出的子腔叫做主腔,对光参量起调节作用的子腔被称为从属腔。从属腔的腔镜调谐时,会对输出光的光强、频率和偏振态等参量产生作用,这就是激光回馈效应,也叫自混合干涉效应。弱复合腔已经在激光自传感测量和精密测量等领域得到了应用。

2.3　复合腔产生双频或双波长光输出

在谐振腔中加入分光片等光学分束元件可以使光在传播路径上发生分离,形成两个腔长不同的子腔,在各子腔中可以产生双波长或双频率激光振荡。这种结构由于加入分光元件,增加了谐振腔的损耗,而两子谐振腔光模式共同分配增益,故对激光器的增益要求提高。

1996 年,S. Pajarola 和 G. Guekos 在 InGaAsP 激光器与双光栅组成的分叉复合腔中(如图 4 所示),使用偏振分光片分离 TE 模和 TM 模在两子腔中起振,实现正交偏振双频激光输出,其频差调谐范围为 0.2 ~60 GHz,由于采用外腔结构,频差稳定性及复现性受限,频差稳定性在 5 MHz 左右[7]。2005 年,加拿大 Dalhousie 大学的 Wei Wang,Michael Cada 等报道了一个由一对布拉格光栅所组成长度不等子腔的直线型可调谐、双频外腔激光器(如图 5 所示),增益介质采用 Inphenix 公司的 IPSGC1550 模块,通过两个光栅之间光纤的温度变化来改变光纤的长度,进而实现输出频差调谐,可调谐范围 200 MHz,单频线宽 2 MHz[8]。

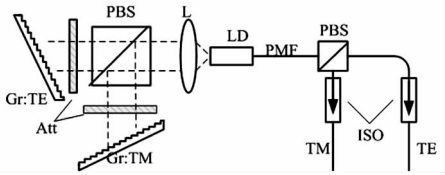

图 4　一种分叉型复合腔双频激光器结构

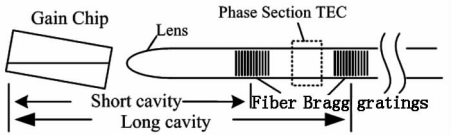

图 5　一种直线型复合腔双频激光器结构

2009 年,中国科技大学的苏觉、洪蕾采用共用掺铒光纤(EDF)作为增益媒质加两路对称单模光纤组成的子谐振腔结构实现了光纤激光器的双波长、可调谐输出,波长间隔可调谐范围从 0.019 ~ 15 nm[9]。

3　不同应用复合腔的比较

通过上面的总结可以发现,复合腔的结构与简单腔相比更为复杂,一般有更多的光学元件,因此谐振腔的总损耗也就更大。复合腔的子腔共用增益介质,不同模式的光往往各自的增益系数减小,所以谐振腔中光波模式的增益和损耗的关系是激光器能否正常运转的关键。

对于弱复合腔,其从属腔不需要产生激光振荡,只需要其反射光能够进入主腔,对光场模式进行参量调制,其从属腔的损耗可以很大;对于纵模选择的复合腔,两个子腔光场工作在单一模式,因而对谐振腔损耗要求较小;而对于双波长复合腔,不同波长使

用增益介质不同能级的原子产生受激辐射,两个波长的光相互作用很小,故只需要不同波长光的增益大于其子腔损耗即可;对于双频复合腔,增益介质为两个频率激光提供增益,两个频率光在介质增益曲线上的位置有所下降且有可能产生强烈的模式竞争,对谐振腔的损耗要求最高[10]。

4 Y 型腔正交偏振双频 He - Ne 激光器及其在加速度测量中的应用

4.1 Y 型腔正交偏振双频 He - Ne 激光器

作者所在单位自主研发的 Y 型腔正交偏振 He - Ne 激光器基本结构如图 6 所示。其中,PBS 为偏振分光片,它是该激光器的关键元件,经过了特殊的膜层设计和镀膜制作,其对 S 偏振光的反射率和 P 偏振光的透射率都大于 99.9%。由反射镜 M1,PBS 和输出 M2 构成 Y 型腔激光器的 S 子腔;由反射镜 M1,PBS 和输出镜 M3 构成 Y 型腔激光器的 P 子腔。经 PBS 反射后的 S 偏振态光进入由 S 子腔;而经 PBS 透射的 P 偏振态光进入 P 子腔。M1 镜与偏振分光片间是两个子腔的公共端,放有 He - Ne 气体管为两偏振态光提供增益,管中 He 气与 Ne 气的气压比例为 7:1,Ne^{20} 和 Ne^{22} 的同位素配比为 1:1[11]。

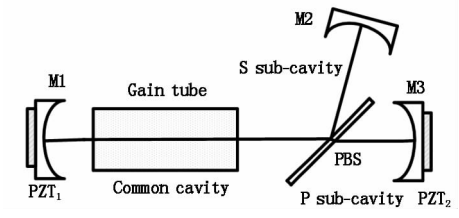

图 6 Y 型腔正交偏振双频 He - Ne 激光器结构

由于腔镜的微弱双折射效应,受激辐射的多纵模 He - Ne 激光器的纵模输出一定是正交偏振的,但它们的偏振方向不确定,其频率 $\upsilon = q\dfrac{c}{2nL}$。对于 Y 型腔正交偏振双频 He - Ne 激光器来说,由于高精度偏振分光片的引入,平行于入射光主平面的 p 光与垂直于主平面的 s 偏振光被选出并分离在各自的子腔与共同腔组成二个光学腔长不等的谐振腔中振荡放大,因而产生两套不同而相互交错的纵模序列。

由于 He - Ne 激光器增益线宽的限制,超出增益线宽的光模式会因为损耗而自行湮灭。最终只留下增益曲线附近的两个,利用光电探测器测量 s 和 p 分量光的干涉光场变化就可以得到双频激光器的拍频输出,这就是 Y 型腔正交偏振双频 He - Ne 激光器的工作原理。

实验中,激光器 M1 镜到偏振分光片 PBS 的公共端的长度选择为 185 cm,从偏振分光片到输出镜 M2 和 M3 的长度为 35 cm,由于激光器的总损耗较大,选择了较长的气体管对激光放大,实现了激光器 3 纵模稳定运转。频差大小是决定双频激光器质量的重要指标,直接影响了以其为光源的双频干涉仪等计量系统的测量速度和分辨率。实验中,通过改变压电陶瓷 PZT2 上的电压可以调节 P 子腔的长度,进而改变 p 偏振光的频率,得到 s,p 偏振态拍频从 26 ~ 665 MHz 的宽范围动态变化,激光器的频率稳定性主要受增益介质的热效应影响,由于采用双频光共用增益介质,拍频差动输出的特性,热效应对两个光模式频率的影响相互抵消,故输出稳定性很高,小于 10 kHz。

4.2 Y 型腔正交偏振双频 He - Ne 激光器在加速度测量中的应用

作者所在实验室又在 Y 型腔正交偏振激光器的基础上,研制了一种新型的气体膜盒式双 Y 型腔双频激光加速度计。在激光器中加入以气体膜盒作为第一级敏感元件,使输入的加速度信号转化为膜盒内气体的折射率变化,进而改变一个子腔的光学腔长,使激光器输出拍频感应加速度输入。其优势在于,Y 型腔激光器的独特结构使 s,p 分量偏振光共用增益区,双频光的频率差动输出和对称的双 Y 型腔结构有效消除由增益介质热效应而引起的双频光频率漂移,从而比其他激光加速度计具有更高的分辨率。通过理论计算,该新型气体膜盒式 Y 型腔双频激光加速度计的比例因子为 1.19×10^{8} Hz/(m · s^{-2}),分辨率可以达到 1.15×10^{-6} g[12]。

5 总 结

本文从复合腔的定义出发,分析了几种不同复合腔的结构及其应用。并对不同复合腔的区别加以分析,指出了激光器能够正常工作,必须根据具体应用,减小复合腔的损耗。最后,本文介绍了作者所在实验室新研制的 Y 型腔双频激光器和基于该激光器研制的气体膜盒式双 Y 型腔双频激光加速度计,分析了其结构特点、输出特性和优势。

参考文献:

[1] Yu D Kolomnikov, V N Lisitsyn, V P Chebotaev. Laser michelson interferometer [J]. Opt Spectrosc (USSR), 1967, 22: 490 - 499.

[2] P W Smith. Stabilized single-frequency output from a long laser cavity[J]. Quantum Electron, 1965, QE - 1: 343 - 348.

[3] D A Kleinman, P P Kisliuk. Discrimination against unwanted orders in the Fabry-Perot resonator[J]. Bell Syst Tech, 1962, 41: 453 – 462.

[4] H Kogelnik, C K N Patel. Mode suppression and single frequency operation in gaseous optical masers[J]. Proc IRE (Corresp), 1962, 50: 2365 – 2366.

[5] Jianluo Zhang, Chaoyu Yue, Gregory W Schimstable. Single-mode compound-ring rbium-doped fiber laser[J]. Lightwave Technology, 1996, 14(1): 104 – 109.

[6] C H Yeh T T Huang, H C Chien, C H Ko, et al. Tunable S-band erbium-doped triple-ring laser with single-longitudinal-mode operation[J]. Optics Express. 2007, 15(2): 382 – 386.

[7] S Pajarola, G Guekos, H Kawaguchi. Frequency tunable beat note from a dual-polarization emitting external cavity diode laser[J]. Optical and Quantum Electronics, 1997, 29(4): 489 – 499.

[8] Wei Wang, Cada M, Seregelyi J. A beat-frequency tunable dual-mode fiber-bragg grating external-cavity laser[J]. Photonics Technology Letters, 2005, 17 (11): 2436 – 2438.

[9] Su Jue, Hong Lei, Qian Jingren. Tunable dual-frequency er-doped fiber ring laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(3): 643 – 646. (in Chinese)
苏觉, 洪蕾, 钱景仁. 可调双频光纤环形腔激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(3): 643 – 646.

[10] Xiao Guangzong. Abecedarian research of frequency laser accelerometer with double Y-shaped cavity dual-frequency He-Ne laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012: 88 – 90. (in Chinese)
肖光宗. 基于 Y 型腔正交偏振双频激光器的激光加速度计初步研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2012: 88 – 90.

[11] Guangzong Xiao, Xingwu Long, Bin Zhang. A novel orthogonal polarized dual-frequency laser using a Y-shaped cavity[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43 (7): 920 – 922.

[12] Guangzong Xiao, Xingwu Long, Bin Zhang, et al. A novel active optical approach for acceleration measurement based on a Y-shaped cavity dual-frequency laser[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(2): 344 – 348.