

文章编号: 0258-7025(2008)07-1005-04

激光稳频的共焦法布里-珀罗干涉仪

孙旭涛 刘继桥 周 军 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所先进激光与应用系统实验室, 上海 201800)

摘要 针对多普勒激光雷达激光源短期频率漂移低于 1 MHz 的要求,设计了一种共焦干涉仪作为频率标准进行稳频。通过对三种不同材料制成的共焦法布里-珀罗(Fabry-Perot)干涉仪中心频率随温度漂移情况进行分析对比,选用零膨胀微晶玻璃材料制作共焦法布里-珀罗干涉仪,腔镜和隔离器通过光胶的方式进行组合,并且置于温控精度优于 0.01 K 的双层密封温控箱中。经过实验测量,共焦法布里-珀罗干涉仪的自由光谱范围为 370 MHz,透射谱半峰全宽(FWHM)为 1.7 MHz,精细度为 220。采用该共焦干涉仪进行稳频,理论稳频精度可达 0.15 MHz,满足激光多普勒雷达单频激光源的稳频要求。

关键词 激光技术;共焦法布里-珀罗干涉仪;自由光谱范围;激光稳频;多普勒激光雷达

中图分类号 TN 958.58;TH 744.3 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20083507.1005

Confocal Fabry-Perot Interferometer for Frequency Stabilization of Laser

Sun Xutao Liu Jiqiao Zhou Jun Chen Weibiao

(The Novel Laser Technique and Application System Laboratory,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The frequency excursion of laser source of Doppler lidar should be less than 1 MHz. To satisfy this demand, a confocal Fabry-Perot (F-P) interferometer was manufactured as the frequency standard for frequency stabilization. After analyzing and contrasting the center frequency excursion of confocal Fabry-Perot interferometers that are made of three different types of material with the change of temperature, the zerodur material was selected to fabricate the interferometer, and the cavity mirrors were optically contacted onto the end of spacer. The confocal Fabry-Perot interferometer was situated within a double-walled chamber, and the change of temperature in the chamber was less than 0.01 K. The experimental results indicate that the free spectral range is 370 MHz, the full-width at half maximum (FWHM) is 1.7 MHz, and the finesse is 220. Using this interferometer as frequency standard of frequency stabilization, the theoretical frequency excursion is 0.15 MHz, which satisfies the need of frequency stabilization of single mode laser of Doppler lidar.

Key words laser technique; confocal Fabry-Perot interferometer; free spectral range; frequency stabilization; Doppler lidar

1 引 言

在光通信、光频标、激光雷达等领域对激光频率稳定有着较高的要求。激光稳频问题,其关键之一在于选取一个稳定的参考频率标准。目前的主要方法有:以增益曲线作为标准稳定激光频率,但很难达到很高的稳定度;利用塞曼效应或斯塔克效应稳定

激光频率^[1],稳定度可达 10^{-9} ;利用分子原子吸收谱线稳定激光频率^[2,3],频率稳定度可高达 $10^{-13} \sim 10^{-14}$,但原子特定谱线的频率覆盖范围有限,限制了这种方法在不同波长激光器中的应用;利用光学元件稳定激光频率,主要元件是共焦法布里-珀罗(Fabry-Perot)干涉仪^[4~7],优点是不受波段的限制,

收稿日期:2007-11-01;收到修改稿日期:2007-12-06

基金项目:国家 863 计划(2006AA12Z126)资助项目。

作者简介:孙旭涛(1979—),男,黑龙江人,博士研究生,主要从事单频全固态激光器稳频技术方面的研究。

E-mail: xutaosun@yahoo.com.cn

导师简介:陈卫标(1969—),男,上海人,研究员,博士生导师,主要从事激光遥感、遥测和激光雷达方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shnc.ac.cn

且随着光学加工技术的发展,可以得到很高的精细度。目前国内外报道的稳频工作主要以共焦法布里-珀罗干涉仪作为频率标准。

共焦法布里-珀罗干涉仪也被称为球面干涉仪^[8]。相比于平面法布里-珀罗干涉仪,共焦法布里-珀罗干涉仪受校整和腔镜面型的影响较小,可以得到更高的精细度,因此有很高的集光本领和光谱分辨率,已广泛用于探测激光的模式结构和线宽。

本课题组正在研制多普勒激光雷达^[9,10],采用种子注入的 Nd:YAG 三倍频激光器作为发射光源^[11],由于多普勒激光雷达对激光频率要求相对稳定,短期内频率漂移需低于1 MHz。为此,设计、研制了一个共焦法布里-珀罗干涉仪,其腔镜及隔离器均使用具有极高温度稳定性的零膨胀微晶玻璃材料制成,采用光胶方式组合而成。本文介绍该干涉仪结构、特性及其测量结果,并将应用在多普勒激光雷达光源的频率稳定中。

2 结 构

在稳频系统中,激光频率的稳定性主要取决于参考频率的稳定性,其频率的微小变化直接导致激光的频率漂移,因此稳频系统中的频率标准本身必须具有较高的稳定性。对于法布里-珀罗干涉仪,其不稳定性主要是由于温度变化引起腔长变化,从而导致共振频率变化。对于一个共焦法布里-珀罗干涉仪,光线平行于干涉仪的轴进入,干涉仪的腔长为 L ,激光的波长为 λ ,透射极大的条件为

$$4nL = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中 n 为腔内折射率。因此当腔长变化 $\lambda/4$ 时,透射光从一个极大值跳到另一个极大值,对应频率变化为一个自由光谱范围 $c/4L$, c 为光速。假设法布里-珀罗隔离器材料的热膨胀系数为 α , 当温度变化量为 ΔT , 腔长变化量随温度变化量的变化为

$$\Delta L = \Delta T \alpha L, \quad (2)$$

这样,由温度变化引起的干涉仪中心频率漂移为

$$\Delta \nu_{F-P} = \frac{n\alpha L \Delta T}{\lambda/4} \frac{c}{4L}, \quad (3)$$

由(3)式可得,干涉仪的频率漂移要低于1 MHz,一方面要选择膨胀系数低的材料来制作干涉仪,另一方面要保持温度稳定。

另外,温度的变化不仅引起隔离器长度的变化,同样会引起腔镜面型的变化,破坏频率稳定性,所以考虑用同种材料制作隔离器和腔镜,整个系统膨胀系数相同,而且便于隔离器与腔镜进行光胶。光学

加工中常用的融石英,光学特性优良,但是热稳定性较差,膨胀系数为 $0.55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。Corning 公司的超低膨胀玻璃 (ULE) 材料膨胀系数很低,低于 $0.03 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。德国 Schott 公司生产的零膨胀微晶玻璃材料,膨胀系数低于 $0.05 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。根据(3)式,可以对比三种不同材料制作的干涉仪随温度的频率漂移。

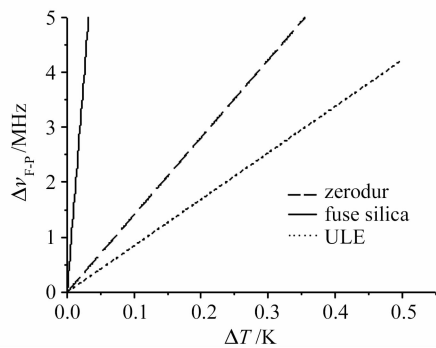


图1 共焦干涉仪的中心频率漂移与温度变化量的关系
Fig. 1 Center frequency excursion of confocal F-P interferometers versus temperature variation

由图1可见,融石英材料制作的干涉仪温度特性较差,在很小的温度变化范围内频漂超过1 MHz。ULE 材料制作的干涉仪温度特性最好,但是考虑到 ULE 光学特性较差,很少用于制作镜片,所以放弃。综合考虑选择微晶玻璃来制作共焦法布里-珀罗干涉仪。

共焦法布里-珀罗干涉仪的结构如图2所示,隔离器呈圆筒形状,长200 mm,外径41 mm,内径即通光口径24 mm。腔镜是平凹镜,凹面曲率半径200 mm,光胶在隔离器两端,两个凹面中心相距200 mm。平面镀1064 nm增透膜,透射率99.92%,凹面镀1064 nm全反膜,反射率为99.88%。凹面面型经过干涉仪检测,镀膜前面型均方根(RMS)值为 0.003λ , 峰谷值(PV)为 0.03λ , 镀膜后,面型受到一些影响,RMS 值为 0.008λ , PV 值为 0.075λ , 检测波长633 nm。

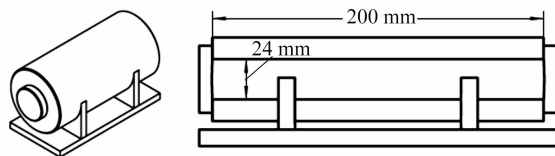


图2 共焦法布里-珀罗干涉仪结构图

Fig. 2 Schematic of confocal F-P interferometer

同时为了最大范围降低温度及外界环境变化带来的影响,将共焦法布里-珀罗干涉仪置于双层密封温控箱中,温控精度优于0.01 K,通过(3)式可得出

采取以上两项措施后,温度引起的干涉仪中心频率漂移低于1 MHz。

3 精细度测量

法布里-珀罗干涉仪腔长选定后,透射谱的半峰全宽(FWHM)主要由精细度确定。对于平面法布里-珀罗干涉仪,精细度主要由面型精细度和反射精细度共同决定,因此决定了精细度不会很高。对于共聚焦法布里-珀罗干涉仪,总精细度一般比平面法布里-珀罗干涉仪的总精细度要高,主要原因有共聚焦干涉仪受校整的影响较小,球面腔镜的倾斜不改变通过干涉仪的光程长度;球面镜可以抛光得比平面镜的面型精度更高,而且球面面型的偏差并不抹去干涉结构,只引起干涉环系统的畸变。

对共聚焦干涉仪的精细度进行测量,光源使用 Innolight 公司生产的单块非平面环形腔 Nd:YAG 激光器,波长1064 nm,输出功率200 mW,可通过外加电压改变激光晶体的温度来连续调谐频率,调谐系数3.4 GHz/V。激光器的线宽很窄,为1 kHz,可以忽略在精细度测量过程中由激光线宽带来的误差。实验中对激光器加载 $-0.3 \sim 0.3$ V斜波电压,周期为30 s,对应频率调节系数为34 MHz/s,频率的调谐范围为1020 MHz,大于2个自由光谱范围。实验装置框图如图3所示。透镜1,2用于模式匹配。激光经过两个反射镜后入射到干涉仪内。透射光经过透镜3后聚焦到光电二极管上,通过示波器进行记录。图4为干涉仪的透射谱,经测量自由光谱范围为374 MHz,对应腔长为200.5 mm,单个透射峰的半峰全宽为1.7 MHz,由此计算出干涉仪的精细度为220。针对多普勒激光雷达光源的频率稳定,拟利用该干涉仪,采用边频锁定稳频方案^[12]。根据该技术路线,经过稳频后理论上的激光频率漂移为

$$\Delta\nu = \frac{\pi^3 h\nu(\Omega^2 + \pi^2 \delta\nu^2)^2 \delta\nu^2}{2\Omega^4 J_0^2(\beta) P_0 \eta} + \Delta\nu_{\text{F-P}}, \quad (4)$$

式中 h 为普朗克常数, ν 为激光频率, Ω 为光电调制频率, $\delta\nu$ 为法布里-珀罗干涉仪线宽, β 为调制系数,

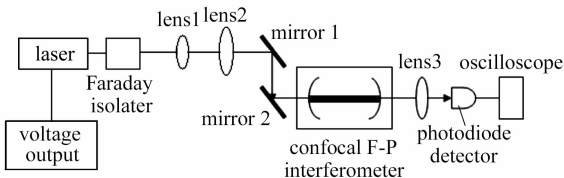


图3 精细度测量实验框图

Fig. 3 Experimental schematic of measuring finesse

P_0 为入射光功率, η 为光电探测器的量子效率。通过(4)式可见法布里-珀罗干涉仪的温度漂移是影响稳频结果的最重要因素。实验中选取 $\Omega = 30$ MHz, $\beta = 1.08$, $P_0 = 100$ mW, $\eta = 0.12$,并使用半峰全宽为1.7 MHz,温控精度优于0.01 K的共聚焦法布里-珀罗干涉仪作为频率标准进行稳频,经计算理论上稳频精度为0.15 MHz,完全可以满足多普勒测风雷达激光源的稳频要求。

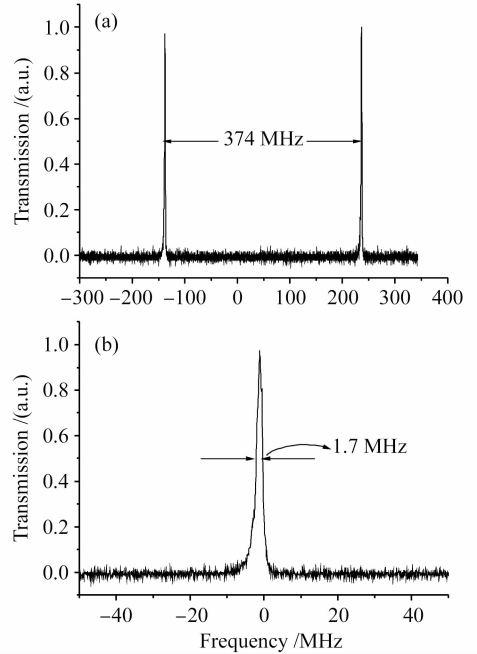


图4 共聚焦法布里-珀罗干涉仪透射谱
(a) 双峰;(b) 单峰

Fig. 4 Transmission spectrum of confocal F-P interferometer. (a) double peaks; (b) single peak

4 结论

提出了一种新型的共聚焦法布里-珀罗干涉仪,隔离器和腔镜均使用具有极低热膨胀系数的零膨胀微晶玻璃制成,通过光胶的方式进行组合,置于温控精度优于0.01 K的双层温控箱内,具有极高的温度稳定性。经测试,共聚焦干涉仪透射谱的半峰全宽为1.7 MHz。理论表明使用该干涉仪稳频,稳频精度可控制在0.15 MHz内,完全可以满足针对多普勒激光雷达激光源短期内频漂低于1 MHz的稳频要求。

参考文献

- 1 Steve Lecomte, Emmanuel Fretel, Gaetano Mileti *et al.*. Self-aligned extended-cavity diode laser stabilized by the Zeeman effect on the cesium D_2 line [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(9): 1426~1429
- 2 Gianluca Galzerano, Marcello Marano, Stefano Taccheo *et al.*.

2. 1 μm lasers frequency stabilized against CO_2 lines- comparison between fringe-side and frequency-modulation locking methods [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(4):248~250
- 3 E. Inbar, V. Mahal, A. Arie. Frequency stabilization of Nd:YAG lasers to $^{133}\text{Cs}_2$ sub-Doppler lines near 1064 nm [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(7):1598~1604
- 4 T. Day, Eric K. Gustafson, Robert L. Ber *et al.*. Sub-Hertz relative frequency stabilization of two-diode laser-pumped Nd:YAG lasers locked to a Fabry-Perot interferometer [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4):1106~1117
- 5 Masaharu Hyodo, Timothy Carty, Kiyomi Sakai. Near shot-noise-level relative frequency stabilization of a laser-diode-pumped Nd:YVO₄ microchip laser [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(24):4749~4753
- 6 Mitsuru Musha, Takeshi Kanaya, Ken'ichi Nakagawa *et al.*. The short- and long-term frequency stabilization of an injection-locked Nd:YAG laser in reference to a Fabry-Perot cavity and an iodine saturated absorption line [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **183**:165~173
- 7 Du Zhijing, Zhang Yuchi, Wang Xiaoyong *et al.*. Locking multiple wavelength lasers to the transition of cesium atoms by using a Fabry-Pérot transfer cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3):452~457
- 8 Michael Hercher. The spherical mirror Fabry-Perot interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1968, **7**(5):951~966
- 9 Liu Jiqiao, Bu Lingbing, Zhou Jun *et al.*. Optical frequency discriminator of a mobile direct-detection Doppler wind lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10):1339~1344
刘继桥, 卜令兵, 周 军 等. 车载直接探测多普勒测风激光雷达光学鉴频器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1339~1344
- 10 Bu Lingbing, Liu Jiqiao, Chen Weibiao. Discrimination of Doppler frequency shift based on Fizeau interferometer and PMT array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3):379~383
卜令兵, 刘继桥, 陈卫标. 基于菲佐干涉仪和多通道光电倍增管阵列的多普勒频移检测技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3):379~383
- 11 Jun Zhou, Ting Yu, Jinzi Bi *et al.*. Diode pumped injection seeded Nd:YAG laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(5):292~293
- 12 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. *Appl. Phys. B*, 1983, **31**(2):97~105

“名家讲坛”栏目约稿

《激光与光电子学进展》是中国科学院上海光学精密机械研究所主办的的科技进展类期刊,中文核心期刊,创刊于1964年,是国内第一本激光领域的专业期刊。本刊以及时报道国内外激光与光电子学领域科技的最新研究成果与技术应用为宗旨,促进国内外学术交流,沟通科研与产业的联系。

期刊品牌栏目“名家讲坛”邀请国内外知名光学专家您撰写前沿综述,讲述激光与光电子发展过程中关键技术、重要突破以及目前的研究热点,为读者提供最有参考价值的文章。综述性文章信息量大,是研究人员开阔视野、寻找课题的最佳参考文献,但要求作者对专业有比较深的造诣。

从2006年栏目开办以来已发表清华大学丁海曙教授、北京交通大学吴重庆教授、天津大学张以谟教授、中山大学汪河洲教授、华中科技大学周治平教授等的文章,网站单篇浏览量超过1000次,并被多次引用,受到读者的热烈欢迎。

本栏目基本要求如下:

1) 执笔人(第一作者)应在激光与光电子应用领域具有一定造诣,在某一方面有较深入的研究或者能够纵观全局;

2) 文章主要内容涉及理论探讨、技术突破、材料研发和市场开拓等相关领域,内容在激光、光电子领域具有重要地位,具有客观的总结性或者高度的前瞻性;

3) 文章要求通俗易懂,行文生动,并配有一定数量的彩色图表,字数不少于6000,最多不超过20000;

4) 投稿同时,请作者提供作者简介(包括研究领域、主要研究成果和一张照片);

5) 论文一经录用,本刊将优先发表,并支付丰厚稿酬。

6) 投稿方式:在线投稿:www.opticsjournal.net/lop.htm 或 E-mail:lop@siom.ac.cn;垂询电话:021-69918166

《激光与光电子学进展》编辑部

2008-06-23