

Y型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差影响因素研究

傅杨颖 肖光宗* 龚梦帆 陈鑫麟 张 斌

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 针对自主研制的Y型腔正交偏振He-Ne双频激光器,利用Lamb半经典理论分析抽运电流、工作点和谐振腔损耗等因素对闭锁阈值频差的影响规律。搭建了Y型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差测量系统,从实验上开展对双频激光器闭锁阈值频差影响因素研究。通过改变抽运电流值和公共腔镜上压电陶瓷电压研究抽运电流和工作点对激光器闭锁阈值频差影响。实验结果表明,激光器闭锁阈值频差随抽运电流值增加而减小,工作点越靠近增益曲线中心,激光器闭锁阈值频差越小。当激光器抽运电流值大于2.2 mA时,调节公共腔压电陶瓷电压至最佳工作点处,激光器闭锁阈值频差可降至几兆赫兹甚至更低。

关键词 激光器; Y型腔; 闭锁阈值频差; 抽运电流; 工作点

中图分类号 TN242 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1002001

Study of Locking-Threshold Frequency Difference on Y-shaped Cavity Orthogonal Polarized Dual-Frequency Laser

Fu Yangying Xiao Guangzong Gong Mengfan Chen Xinlin Zhang Bin

College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Based on the Y-shaped cavity orthogonal polarized dual-frequency helium-neon laser, the influences of pump current, operating point as well as the loss of resonator on the locking-threshold frequency difference are analyzed according to Lamb's semi-classical theory. In order to measure the minimum frequency difference of the Y-shaped cavity orthogonal polarized dual-frequency helium-neon laser, an experimental system is set. Various factors, especially pump current and operating point, are studied in the experiment for the first time. The results show that either the pump current increasing or operating point approaching the gain curve center can cause the minimum frequency difference to decrease. When the pump current value is greater than 2.2 mA with its working state at the optimal operating point, the locking-threshold frequency difference can be less than several MHz.

Key words lasers; Y-shaped cavity; locking-threshold frequency difference; pump current; operating point

OSIC codes 140.3410; 140.3425; 140.3430

1 引 言

正交偏振双频激光器中普遍存在频差闭锁现象,所谓频差闭锁,是指双频激光器中某种偏振光因抢不到足够的增益粒子而熄灭,导致激光器仅有单一偏振光输出的现象。双频激光器发生频差闭锁时所对应的临界频差称为闭锁阈值频差,闭锁阈值频差可表征激光器内模式竞争强弱程度。双频激光器出现频差闭锁的根本原因在于不同模式对增益粒子的竞争,频差闭锁严重影响双频激光器输出频差范围、频差稳定性等。

关于激光器频差闭锁现象的研究,主要建立在塞曼双频激光器和双折射双频激光器上。基于塞曼效应和频率牵引效应形成的塞曼双频激光器,其频差输出范围为几十kHz到3 MHz^[1]。在磁场作用下,激光器增

收稿日期: 2015-03-04; 收到修改稿日期: 2015-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(61308058)

作者简介: 傅杨颖(1991—),女,硕士研究生,主要从事新型激光器方面的研究。E-mail: fuyangying09@126.com

导师简介: 张 斌(1970—),男,教授,硕士生导师,主要从事新型激光器方面的研究。E-mail: kd208zb@sina.com

*通信联系人。E-mail: xiaoguangzong@163.com

益介质发生塞曼效应,有效地抑制了频差闭锁,其闭锁阈值频差可达几十千赫兹。基于双折射效应形成的双折射双频激光器,其闭锁阈值频差约为 40 MHz^[2],激光器存在严重的频差闭锁现象。国内清华大学张书练等^[3-4]基于双折射双频激光器进行了大量频差闭锁现象研究,提出并研制了“双折射—塞曼双频激光器”,激光器闭锁阈值频差可降至 1 MHz;2001 年,又研制出“双双折射双频激光器”,其闭锁阈值频差可降至几兆赫兹^[5-6]。国防科学技术大学^[7]研制的 Y 型腔正交偏振双频激光器,其闭锁阈值频差约为 22 MHz。目前尚未有关于影响双频激光器闭锁阈值频差因素的相关报道。

本文主要基于 Y 型腔正交偏振双频激光器,研究影响其闭锁阈值频差的因素及规律。Y 型腔正交偏振双频激光器作为一种新型复合腔结构双频激光器,具有输出频差可调范围广、频差稳定性高等优势。文献[7-8]对 Y 型腔正交偏振双频激光器基本结构和原理进行了介绍,研究了激光器输出模式、光功率、频差调谐特性等基本特性,激光器闭锁阈值频差约为 22 MHz。文献[9]通过研究 Y 型腔正交偏振双频激光器的光强调谐特性,分析总结了影响激光器光强调谐特性的各种因素及规律。文献[10-11]基于 Y 型腔正交偏振双频激光器提出了一种新型的高精度激光加速度计,激光器输出拍频与加速度呈线性关系,其测量分辨率可达 $10^{-5} \sim 10^{-6} g$ 。文献[12]创新性地提出了一种基于 Y 型腔正交偏振双频激光器的高精度力值测量方法,其力值测量范围可达 5 个量级,分辨率为 $10^{-6} N$ 。

本文基于 Lamb 半经典理论,分析了抽运电流、工作点、谐振腔损耗和正交偏振模间频差等因素对双频激光器闭锁阈值频差的影响规律。搭建了 Y 型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差实验测量系统,并进行了双频激光器闭锁阈值频差影响因素实验研究,重点研究了抽运电流和激光器工作点对 Y 型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差的影响。

2 理论分析

模竞争作为激光器中重要物理现象而普遍存在。所谓模竞争,是指不同谐振模式间拍频小于某临界值时,不同模式间出现对增益粒子竞争的现象。Y 型腔正交偏振双频激光器作为一种新型双频激光器,其模竞争现象通常发生在相邻两正交偏振纵模之间。

Lamb 半经典理论指出,谐振腔内模式竞争强弱程度可用模式耦合系数 C 表示,耦合系数 $C = \frac{\theta_{12}\theta_{21}}{\beta_1\beta_2}$,式中 θ_{12} 、 θ_{21} 为光强互饱和系数,表示某一谐振纵模光强饱和效应对另一谐振纵模光强影响; β_1 、 β_2 为光强自饱和系数,表征谐振纵模自身光强饱和效应强弱。文献[13]中给出了饱和系数 θ_{12} 、 θ_{21} 、 β_1 、 β_2 的解析式,在此不再赘述。耦合系数 C 反映了两频率之间的耦合程度, C 越小,两个频率之间的耦合越小。一切影响饱和系数的因素都将引起模式耦合系数的改变,即改变两频率间模竞争强弱程度。

利用小振动分析法求解激光器强度方程^[13],得到双模稳定工作必要条件,即 $C < 1$ 。针对 Y 型腔正交偏振双频激光器,所谓闭锁阈值频差,是指 $C = 1$ 时所对应的相邻两正交偏振纵模间频差。模式耦合系数 C 越大,两正交偏振纵模对增益粒子的竞争越激烈,Y 型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差越大。

根据 C 的定义可知,影响双频激光器模式耦合系数的因素主要有抽运电流、谐振腔中气体压强、激光器工作点 [文献[14]给出了激光器工作点定义,即激光器内振荡纵模在激光器增益曲线上的位置。针对双频激光器,工作点用 $(\omega - v_{m,n})$ 项表示, ω 表示跃迁产生光谱线中心频率,即增益曲线中心频率, $v_{m,n}(m,n=1,2)$ 表示双频激光器谐振纵模频率, $(\omega - v_{m,n})$ 项越小,工作点越靠近增益曲线中心]、谐振腔损耗、增益介质在谐振腔中位置,以及正交偏振纵模间拍频等。

激光器工作点越靠近增益曲线中心,模式耦合系数 C 越小,谐振腔内模竞争越弱,双频激光器闭锁阈值频差越小;相邻模式间频差 $\delta(\delta = v_m - v_n)$ 越大,模式耦合系数 C 越小,激光器闭锁阈值频差越小;在激光器增益介质不被击穿情况下,抽运电流值越大,耦合系数 C 越小,激光器闭锁阈值频差越小;激光器闭锁阈值频差还将随激光器谐振腔内损耗的减小而减小。将活性介质置于谐振腔中心位置,调节腔内气体压强至最佳值,将进一步削弱不同模式间模竞争,减小双频激光器闭锁阈值频差。

激光器抽运电流、工作点、模间频差、谐振腔损耗,以及谐振腔内气体压强等因素都将影响模式耦合系数 C ,进一步影响双频激光器闭锁阈值频差。本文研究对象为自主研制的 Y 型腔正交偏振双频激光器,对特定 Y

型腔正交偏振双频激光器,实现抽运电流和激光器工作点的改变较之调节谐振腔内损耗和压强等更简单易行。遵循研究从简入繁的原则,本文实验部分首先重点研究抽运电流和激光器工作点对双频激光器闭锁阈值频差影响,后续实验中,可进一步开展谐振腔损耗、腔内气体压强对双频激光器闭锁阈值频差影响研究。

3 实验研究

Y型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差实验测量装置如图1中所示。虚线矩形框内为Y型腔正交偏振双频激光器,该激光器由公共腔、S子腔和P子腔三部分组成,偏振分光片(PBS)实现正交偏振光的空间分离,P子腔上加压电陶瓷(PZT)PZT1实现对P子腔腔长调节,压电陶瓷PZT2可实现对公共腔长的调节。激光器腔长为130 mm,增益区长度为62.7 mm,公共腔镜曲率半径为8 m,两子腔腔镜曲率半径均为2 m。考虑到激光器增益介质区长度较短,设计过程中为保证激光器能够出光,激光器三个腔镜均采用高反镜,其输出透射率约为0.005%。实验重点研究抽运电流、工作点对激光器闭锁阈值频差影响,利用频谱分析仪(SA)观测激光器闭锁阈值频差变化。

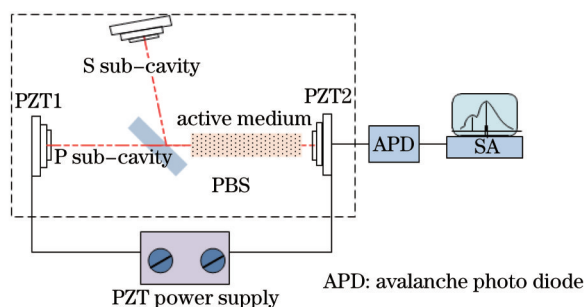


图1 闭锁阈值频差测量实验装置图

Fig.1 Experimental setup for test of lock-in threshold frequency difference

2.1 抽运电流对激光器闭锁阈值频差影响

激光器冷启动1.5 h后,调节抽运电流值在1.6~2.8 mA间变化,调节PZT1、PZT2上电压值,测量得到不同抽运电流值下激光器闭锁阈值频差,实验用频谱仪分辨率为300 kHz。图2为Y型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差随抽运电流变化关系曲线。

测量结果表明,Y型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差随抽运电流值的增加而减小,激光器最小闭锁阈值频差可达10 MHz以下。

为进一步探讨激光器闭锁阈值频差减小原因,分析抽运电流对激光器闭锁阈值频差影响机理及规律,实验进一步测量得到激光器公共腔输出功率随抽运电流变化曲线,如图3所示。

实验结果表明,激光器公共腔输出功率随抽运电流值增加而增大(从图3中可看出,激光器公共腔输出功率在微瓦量级,不利于后续测量以及在传感领域的应用。在后续研究中,将激光器公共腔镜改为输出镜,其输出透射率为0.2%,激光器两个子腔输出功率可达到0.5 mW),因此,可以推论,抽运电流增大引起激光器内增益增大,两正交偏振模式对增益粒子的争夺减弱,模式竞争强度减弱,即模式耦合系数 C 减小,从而引起激光器闭锁阈值频差减小。另一方面,实验用Y型腔正交偏振双频激光器阴极表面积较小,为避免出现阴

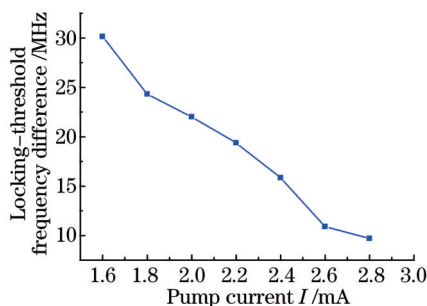


图2 激光器闭锁阈值频差随抽运电流变化关系曲线

Fig.2 Locking threshold frequency difference versus pump current

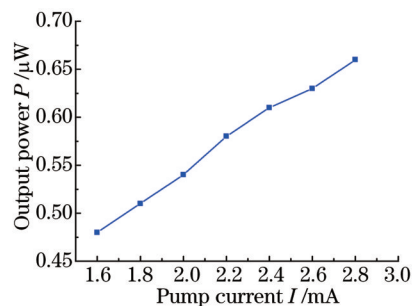


图3 激光器公共腔输出功率随抽运电流变化关系曲线

Fig.3 Output optical power of laser cavity versus pump current

极溅射问题,同时为减小热效应对激光器影响,激光器长期工作时其抽运电流值一般不超过2mA。综合考虑上述两个因素,在保证不损坏激光器条件下,增大抽运电流值可有效减小双频激光器闭锁阈值频差。

3.2 工作点对激光器闭锁阈值频差影响

激光器工作点移动引起腔内谐振纵模增益变化,进一步影响双频激光器中正交偏振模式间对增益粒子的竞争,激光器闭锁阈值频差发生变化。研究Y型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差随工作点的变化规律,对减小激光器闭锁阈值频差具有重要意义。

3.2.1 激光器出光带宽、纵模间隔及工作模式分析

为准确判断Y型腔正交偏振双频激光器工作点位置,需要对激光器出光带宽(BW)、工作模式及纵模间隔等特性进行详细分析。在本实验中改变PZT1上电压实现正交偏振光间频差调节,改变PZT2上电压实现调节激光器工作点,利用频谱分析仪观测激光器腔内纵模分布,其结果如图4中所示。

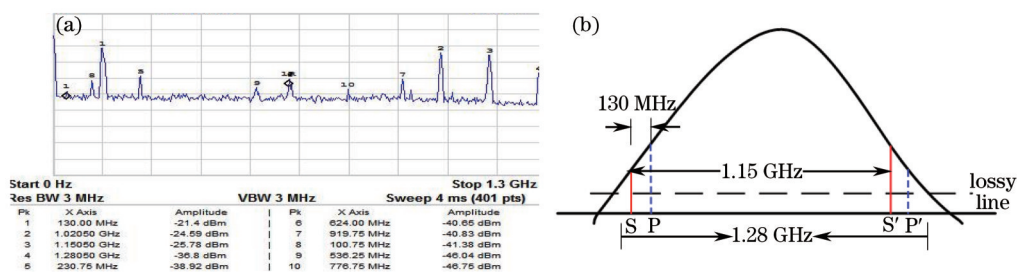


图4 纵模分布图。(a) 频谱分析仪截图;(b) 纵模分布示意图

Fig.4 Graph of distribution of longitudinal modes. (a) Screenshot of spectrum analyzer; (b) sketch for distribution of longitudinal modes

图4中同时存在4个纵模,激光器纵模间隔 $\Delta v_q = 1.15 \text{ GHz}$, 出光带宽 $\Delta v = 1.28 \text{ GHz}$, 根据公式 $\langle L \rangle = \frac{c}{2\Delta v_q}$ 计算得到Y型腔正交偏振双频激光器光学腔长为130 mm。

由于激光器一体化设计中特殊结构问题,在增益区长度仅为62.7 mm时,腔长已达130 mm,激光器内易出现多纵模振荡现象。实验结果表明,Y型腔正交偏振双频激光器谐振腔内可存在多种模式分布:仅两正交偏振纵模[S、P,如图5(a1),(a2)中所示]、三纵模[S、P、S或P、S、P,如图5(b1),(b2)中所示]、四纵模[S、P、S、P、或P、S、P、S,如图5(c1),(c2)中所示]。

3.2.2 工作点对闭锁阈值频差影响

实验中保持抽运电流为2.2 mA不变,改变PZT2上电压调节工作点,连续调节PZT1上电压值,利用频谱分析仪观测激光器公共腔输出频差变化,得到工作点对Y型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差影响规律。实验中,创新性地提出了根据双频激光器公共腔输出光功率确定工作点移动方向的方法:激光器工作点向靠近增益曲线中心方向移动时,增益加强,激光器输出光功率增大;反之,工作点向远离增益曲线中心方向移动,增益减弱,输出光功率减小。

图6所示为相邻两工作点下激光器输出频差示意图,其中,图6(a),(b)中激光器公共腔输出光功率分别为-29.11 dBm和-31.75 dBm,较之图6(a),图6(b)中输出光功率减弱,工作点向远离增益曲线中心方向移动。工作点远离增益曲线中心,激光器闭锁阈值频差由18.7 MHz增加到40.50 MHz,闭锁阈值频差明显增加。

图7中为工作点向靠近增益曲线中心移动时,激光器闭锁阈值频差变化情况。图7(a),(b)中激光器公共腔输出光功率分别为-32.17 dBm和-26.66 dBm,较之图7(a),图7(b)中输出光功率增强,可判断工作点向靠近增益曲线中心方向移动。工作点靠近增益曲线中心,激光器闭锁阈值频差31.50 MHz降至21.50 MHz。

图8所示为激光器闭锁阈值频差随工作点变化关系曲线,图中纵坐标为Y型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差,横坐标为激光器工作点,用相邻两正交偏振纵模中心频率与增益曲线中心频率间频差表示。

研究表明,Y型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差随工作点距离增益曲线中心距离的增大而增大。工作点远离增益曲线中心, $(\omega - v_{m,n})$ 项增大,引起光强自饱和系数 β_1 、 β_2 和互饱和系数 θ_{12} 、 θ_{21} 减小。对Y型腔正交偏振双频激光器,工作点移动对自饱和和作用效应项影响更明显,故工作点远离增益曲线中心

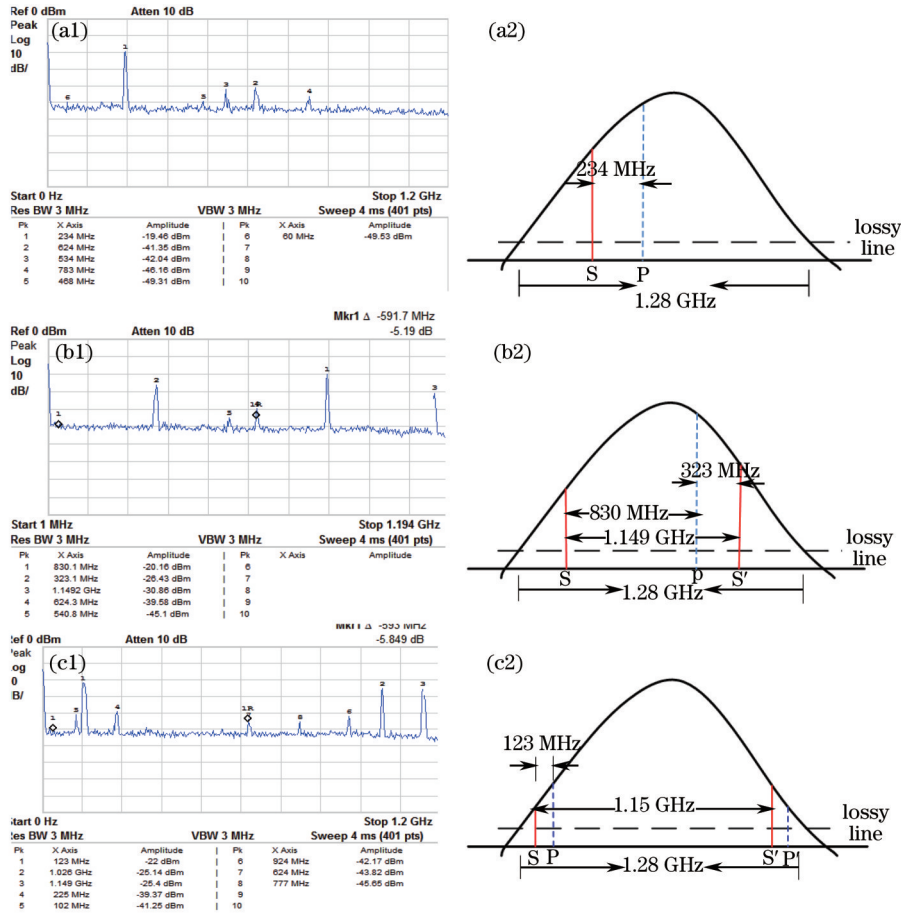


图5 激光器模式分布图。(a1) 双纵模时激光器输出光频谱曲线和(a2)纵模分布曲线；(b1) 三纵模时激光器输出光频谱曲线和(b2)纵模分布曲线；(c1) 四纵模时激光器输出光频谱曲线和(c2)纵模分布曲线。
Fig.5 All the possible cases for distribution of modes. (a1) Spectra curve and (a2) distribution of longitudinal modes of two longitudinal modes; (b1) spectra curve and (b2) distribution of three longitudinal modes of three longitudinal modes; (c1) spectra curve and (c2) distribution of four longitudinal modes

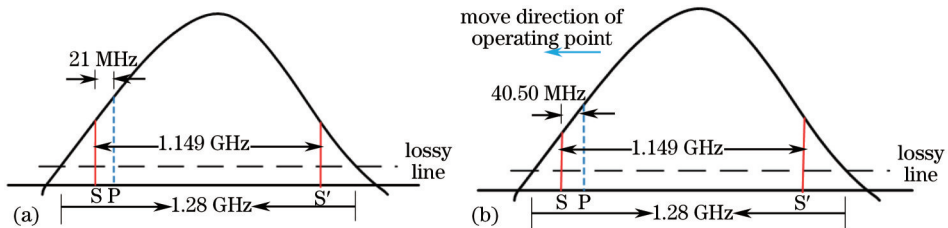


图6 工作点远离增益曲线中心对闭锁阈值频差影响。(a) 闭锁阈值频差 18.7 MHz; (b) 闭锁阈值频差 40.50 MHz
Fig.6 Change of locking threshold frequency difference when operating point is far away from from center of gain.
(a) Locking threshold frequency difference is 18.7 MHz; (b) locking threshold frequency difference is 40.50 MHz.

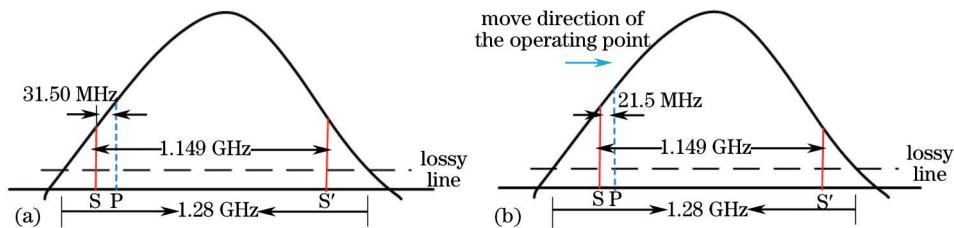


图7 工作点靠近增益曲线中心对闭锁阈值频差影响。(a) 闭锁阈值频差为 31.50 MHz; (b) 闭锁阈值频差为 21.50 MHz。
Fig.7 Change of locking threshold frequency difference when operating point is near center of gain curve.
(a) Locking threshold frequency difference is 31.50 MHz; (b) locking threshold frequency difference is 21.50 MHz.

时,模式耦合系数 C 增大,两正交偏振纵模对增益粒子的竞争增强,双频激光器输出闭锁阈值频差增大。调节激光器工作点, Y 型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差在 7.9~44.25 MHz 间变化。

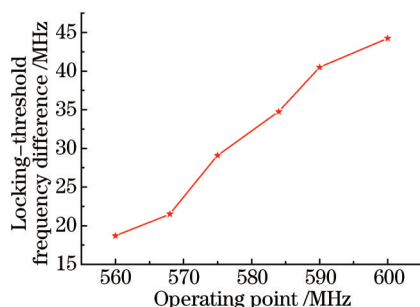


图8 Y型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差随工作点变化关系曲线

Fig.8 Locking threshold frequency difference versus operating point

3 结 论

文中基于 Lamb 半经典理论分析了抽运电流、工作点、模间频差、谐振腔损耗等因素对双频激光器闭锁阈值频差影响规律。首次进行了影响双频激光器闭锁阈值频差实验研究,实验结果与理论分析吻合。在电流允许范围内, Y 型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差随抽运电流值增大而减小;工作点越靠近增益曲线中心,双频激光器闭锁阈值频差越小,理论与实验研究为降低 Y 型腔正交偏振双频激光器闭锁阈值频差提供了思路。抽运电流大于 2.2 mA,调节激光器公共腔长获得最佳工作点,激光器闭锁阈值频差可降至几兆赫兹,其输出频差变化范围为几兆赫兹到 1.15 GHz。

后续研究中可进一步缩短激光器谐振腔长,以保证 Y 型腔正交偏振双频激光器单纵模输出,为实现传感测量应用奠定基础。 Y 型腔正交偏振双频激光器的大频差输出范围可满足工业测量需求,弥补塞曼双频激光器的不足;小闭锁阈值频差使微纳力值测量成为可能,在磁场作用下,有望实现 Y 型腔正交偏振双频激光器的零频差闭锁,即闭锁阈值频差低至几百甚至几十 kHz。

参 考 文 献

- 1 Yang Fujia. Atomic Physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
杨福家. 原子物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- 2 Zhang S, Wu M, Jin G. Birefringent tuning double frequency He-Ne laser[J]. Applied Optics, 1990, 29(9): 1265-1267.
- 3 Xiao Y, Shulian Z, Yan L, *et al.* Zeeman-birefringence He-Ne dual frequency lasers[J]. Chinese Physics Letters, 2001, 18(4): 533-535.
- 4 Li Yan, Zhang Shulian, Han Yanmei. He-Ne dual frequency laser with the frequency difference of 3~40 MHz[J]. High Technology Letters, 2001, (3): 41-44.
李 岩, 张书练, 韩艳梅. 频差 3~40 MHz 的 He-Ne 双频激光器[J]. 高技术通讯, 2001, (3): 41-44.
- 5 Zhang Shulian, Xu Ting, Li Yan, *et al.* The principles and applications of orthogonal linear polarization laser mechanism of orthogonal polarization laser and the study of devices[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(2): 145-154.
张书练, 徐 婷, 李 岩, 等. 正交线偏振激光器原理与应用 (I) — 正交偏振激光的产生机理和器件研究[J]. 自然科学进展, 2004, 14(2): 145-154.
- 6 Zhang Shulian. Principle of Orthogonal Polarized Laser[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
张书练. 正交偏振激光原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 7 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): 1314-1317.
- 8 Xiao Guangzong, Long Xingwu, Zhang Bin. Orthogonal polarized He-Ne laser with Y-shaped cavity and its characteristics[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(11): 2581-2587.
肖光宗, 龙兴武, 张 斌. Y型腔正交偏振激光器及其基本特征[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2581-2587.
- 9 Xiao Guangzong, Long Xingwu, Zhang Bin. Mode competition and laser power tuning property of orthogonal polarized laser with Y-shaped cavity[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0302016.

- 肖光宗, 龙兴武, 张 斌. Y型腔正交偏振激光器的模竞争和光强调谐特性[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302016.
- 10 Guangzong Xiao, Xingwu Long, Bin Zhang, *et al.*. A novel active optical approach for acceleration measurement based on Y-shaped cavity dual-frequency laser[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(2): 344-348.
- 11 Long Xingwu, Xiao Guangzong, Zhang Bin. A new high precision laser accelerometer[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3227-3232.
龙兴武, 肖光宗, 张 斌. 一种新型的高精度激光加速度计[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3227-3232.
- 12 Guangzong Xiao, Xingwu Long, Bin Zhang, *et al.*. Precise force measurement method by a Y-shaped cavity dual-frequency laser[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(10): 101201.
- 13 MSargent III, MOScully, W E Lamb. Laser Physics[M]. London: Addison-Wesley. 1974.
- 14 Xiao Guagnzong. Preliminary Study on Laser Accelerometer Based on Y-shaped Cavity Orthogonal Polarized Laser[D]. Changsha: National University of DefenseTechnology, 2011: 10.
肖光宗. 基于Y型腔正交偏振激光器的激光加速度计初步研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011: 10.

栏目编辑: 宋梅梅