

文章编号: 0258-7025(2004)08-0931-04

半非平面单块激光器快速频率调谐的实验研究

臧二军¹, 曹建平¹, 李成阳¹, 李 晔², 李文博²

(¹ 中国计量科学研究院量子部, 北京 100013; ² 北京交通大学物理系, 北京 100044)

摘要 在半导体激光器抽运的 Nd:YAG 晶体半非平面单块固体环形激光器上, 采用粘贴压电陶瓷(PZT)的方法实现了快速激光频率调谐。对尺寸为 13 mm×14 mm×3 mm 的单块激光器粘贴了厚度为 0.5 mm 压电陶瓷, 并观测两台单块激光器之间的拍频信号。当调制频率小于 100 kHz 时, 对压电陶瓷施加峰值为 5 V 的正弦调制信号, 可观测到大于 10 MHz 的马鞍形展宽拍频信号, 对应的 PZT 调谐系数大于 1 MHz/V。当调制信号频率过高时, 例如频率大于 100 kHz, 拍频信号变得非常不稳定, 说明激光频率产生了明显的漂移, 且拍频信号展宽的形状也发生了变化, 拍频信号的中心部分由凹陷变为凸起。实验观测到的调制响应带宽约为 100 kHz。

关键词 激光技术; Nd:YAG 激光器; 单块激光器; 激光频率调谐

中图分类号 TN 248.1+3; TN 242 **文献标识码** A

Experimental Investigation of Fast Frequency Tuning on Monolithic Semi-Nonplanar Ring Lasers with PZT

ZANG Er-jun¹, CAO Jian-ping¹, LI Cheng-yang¹, LI Ye², LI Wen-bo²

(¹Quantum Department, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)
(²Department of Physics, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract Fast frequency tuning of diode-pumped monolithic semi-nonplanar ring lasers was investigated experimentally using a piezoelectric transducer (PZT). A 0.5 mm thick PZT plate was affixed to a monolithic laser crystal with dimensions of 13 mm×14 mm×3 mm. Beat frequency between two monolithic lasers was observed to check the frequency tuning effect. When the modulation frequency was lower than 100 kHz and the frequency tuning amplitude was 5 V, a widened beat signal could be observed, which gave a PZT tuning coefficient over 1 MHz/V. If the modulation frequency was much higher, such as higher than 100 kHz, the beat signal became unstable and shifted obviously. The shape of the beat signal changed too. Thus the PZT response bandwidth was near 100 kHz for a stable laser frequency tuning.

Key words laser technique; Nd:YAG lasers; monolithic lasers; laser frequency tuning

1 引 言

半导体激光器抽运的单频固体激光器^[1~3], 为人们实际利用固体激光在频域内的优良特性创造了有利条件, 例如激光频率稳定^[4,5]。在连续运转单频固体激光器中, 单块固体环形激光器(MISER 或

NPRO)^[6~9]集单块晶体谐振腔和环形腔的优点于一身, 具有优良的单频运转和极好的功率及开环频率稳定度^[10,11], 已经引起了人们的特殊兴趣, 并在光学频率标准、引力波探测研究、量子光学及干涉测量方面获得了广泛的应用^[12~17]。

激光频率的精密调谐, 是许多实际应用对激光

收稿日期: 2003-05-09; 收到修改稿日期: 2003-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60178009)资助项目。

作者简介: 臧二军(1955—), 男, 中国计量科学研究院研究员, 主要从事固体激光及其频率稳定的研究。E-mail: ejzang@nim.ac.cn

器所要求的重要必备性能。通过控制单块晶体温度,可以实现 5 GHz 乃至 15 GHz 的连续激光频率调谐和几十吉赫的大跨度频率调谐。尽管温度的调谐范围很大,然而温度调谐的响应频率比较低,一般在赫兹或次赫兹的范围。在实际应用中,很多情况下需要对激光频率进行快速调谐,例如几千赫或几十千赫的范围,这时对频率的调谐范围要求并不很大。Owyong 和 Esherick 首先利用压电效应在单块激光器上实现了激光频率的精密调谐^[18],之后 Kane 和 Cheng 采用压电陶瓷(PZT)在非平面和准平面单块形式的环形激光器上实现了快速的频率调谐^[19]。

半非平面单块固体环形激光器具有低的单向运转磁场和宽松的可释放公差已经得到了证明^[20]。本文介绍在半非平面环形激光器上用压电陶瓷实现快速频率调谐的实验研究。

2 实 验

实验采用表面粘接 0.5 mm 厚的压电陶瓷的半非平面单块固体环形激光器如图 1 所示。激光晶体是掺杂浓度为 1.1% 的优质 Nd:YAG 材料。单块尺寸 13 mm × 14 mm × 3 mm,入射角和平面角均为 45°。晶体内光束的环路长度为 30 mm,对应纵模间隔为 5.417 GHz。采用中国科学院半导体所的 2 W 商品半导体激光器作为抽运光源。中心波长为 809 nm,发射孔径为 1 μm × 200 μm。为了有效利用激

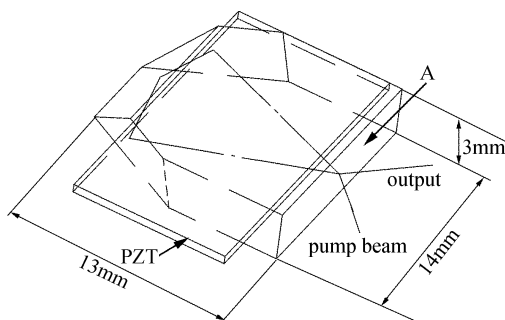


图 1 表面粘接 0.5 mm 厚的压电陶瓷半非平面单块固体环形激光器

由晶体内点划线组成的闭合四边形,表示腔内光束的环形路径, A 是镀膜面,它满足 AR@808 nm,HR@1064 nm 的 s 分量,对于 1064 nm 的 p 分量而言应具有合适的输出耦合透过率

Fig. 1 Scheme of a semi-nonplanar monolithic ring laser and an attached PZT with a 0.5 mm thick

Dot lines express the beam paths. Facet A is coated with AR coating at 808 nm, HR at 1064 nm s component and output coupler at 1064 nm p component

光功率并简化抽运光学系统,在半导体激光器内部装上了镀有增透膜的微型透镜。经过该透镜后,功率损耗约为 5%,在平行与垂直于半导体激光器的发射结方向上,光束发散角 $\theta_{\perp} \times \theta_{\parallel} = 8^{\circ} \times 8^{\circ}$ 。两个焦距为 20 mm 的透镜镀有 808 nm 波长增透膜,用于抽运光束的收集和聚焦。单块晶体放在由两块平行而反向放置的钕铁硼(Nd:iron:boron)材料构成的永久磁铁产生的磁场中。由于采用了半非平面结构,使得稳定的单向激光运转十分容易实现。当输入抽运光功率为 1.5 W 时,可得到 1064 nm 激光单向单频运转输出功率大于 700 mW。

0.5 mm 厚压电陶瓷由中国科学院声学所提供,双面镀有银电极。将压电陶瓷按图示方式粘附在单块晶体的一个表面。单块晶体的另一个表面安装在具有光滑表面的铜制热沉上,可通过 TEC 半导体致冷器进行精密温度控制。通过改变单块晶体的温度可以在几十吉赫范围内调谐激光频率,并在大于 6 GHz 范围内进行连续频率调谐,连续温度调谐率为 -3 GHz/°C。通过调节抽运半导体激光器的驱动电流,也可在较小范围内对激光频率进行调谐。但是通过电流对频率进行调谐时,将伴随有激光输出功率的变化。

对两台半非平面单块环形激光器进行拍频,用 Hamamatsu 的 C5658 型雪崩光电二极管(APD)作为探测元件的集成高速探测器接收经过衰减后的包含有拍频信息的合束激光,用 Agilent 的 E4402B 频谱分析仪观测拍频信号。当未加调制信号时,拍频信号附近 50 MHz 范围内的频谱如图 2 所示,其中频率跨度 50 MHz,幅度为 10 dBm/div,参考功率电平为 0 dBm,分辨率带宽(RBW)为 100 kHz。拍频信号的信噪比约 50 dB。

采用 Stanford Research System 的 DS345 综合

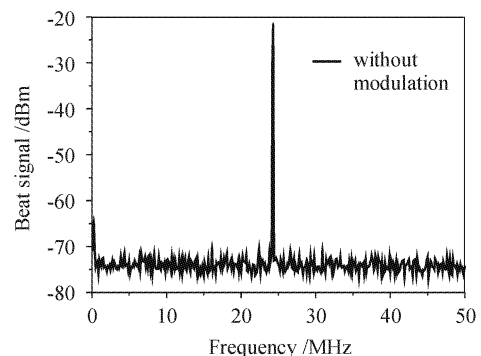


图 2 两台半非平面单块激光器相拍时的拍频信号
Fig. 2 Beat signal between two semi-nonplanar monolithic ring lasers

信号发生器作为调制信号源,对参与拍频的其中一台激光器上的压电陶瓷施加一定频率和幅度的调制信号后,拍频信号出现明显展宽,在此,称其展宽为调制宽度。调制频率为 5 kHz,幅度为 $V_{pp} = 5$ V 时的典型展宽拍频信号如图 3 所示。当改变调制频率和调制幅度时,调制宽度将发生变化。考虑到全电压摆幅等于 2 倍 V_{pp} ,则可得到单位电压摆幅时,拍频信号被调制后的调制宽度,即 PZT 的调谐系数。图 4 给出了调制频率为 1~100 kHz 时的调谐系数

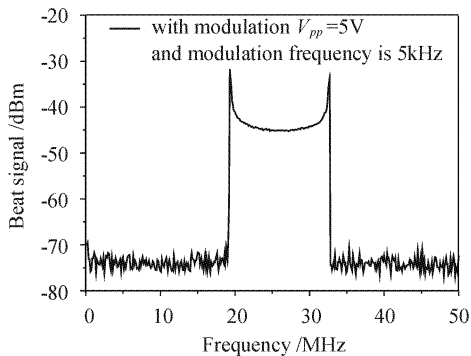


图 3 当一台激光器施加调制后的拍频信号

Fig. 3 Beat signal while the modulation signal is applied on one of the laser

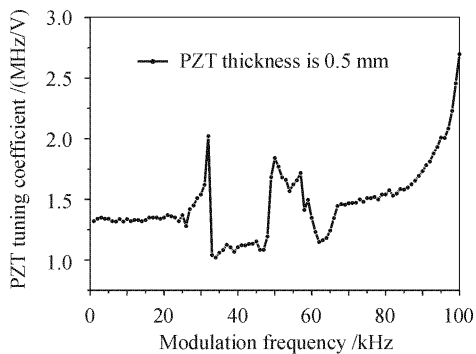


图 4 调谐系数与调制频率的变化关系

其中 $V_{pp} = 5$ V, 调谐系数的测量不确定度在 5% 以内

Fig. 4 PZT tuning coefficient versus the modulation frequency

Modulation amplitude is $V_{pp} = 5$ V. The uncertainty of the PZT tuning coefficient is estimated less than 5%

曲线。由图 4 可见,调制频率在 30 kHz 以下时,调制度随频率的变化比较平稳。30~65 kHz 时产生了明显的起伏。这些起伏可能与压电陶瓷粘附到单块晶体上后,整体构成在该频率范围内存在频率谐振点有关。其谐振频率、品质因数、阻尼状态和电特性等与压电陶瓷的性能、厚度和大小、粘接方式、粘合剂的性能及粘接面积有关。65 kHz 以上时又有

一段较为平坦的区域。而 85 kHz 以上时调制度出现了较为快速的上升,越接近 100 kHz,上升速率越快。

当调制频率大于 100 kHz 时,拍频信号变得非常不稳定,产生了明显的漂移,且拍频信号展宽的形状发生了变化,拍频信号的中心部分由凹陷变为凸起。典型的 101 kHz 时的拍频展宽信号如图 5 所示。漂移的出现可能是由于在接近压电陶瓷的谐振点时,压电陶瓷产生对调制信号的强烈吸收,由此吸收引起的发热造成了对单块激光晶体的加热,引起了激光频率的移动。

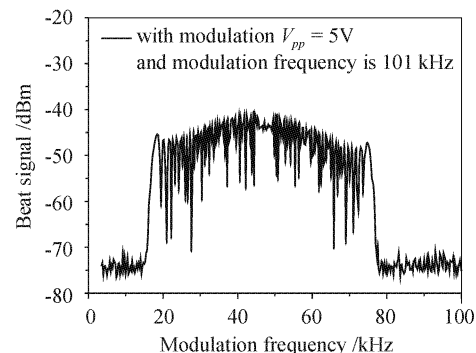


图 5 调制频率为 101 kHz 和 $V_{pp} = 5$ V 时的拍频信号

Fig. 5 Beat signal while the modulation signal is applied on one of the laser

$V_{pp} = 5$ V and modulation frequency is 101 kHz

实验中发现,不同的压电陶瓷,不同的粘接剂种类,不同的粘接面积和粘接方式,以及粘接后单块晶体的固定方式,都有可能对整个系统的频率响应特性造成影响。

以上得到的激光频率的调制度和调制频率响应范围,已经可以用于激光频率的稳定和许多其他实际应用。

3 结 论

用压电陶瓷实现了半非平面单块固体环形激光器的快速频率调谐。这种调谐为进一步实现激光频率稳定奠定了必要的基础。

参 考 文 献

- 1 Zhang Kuanshou, Zhang Yun, Xie Changde *et al.*. All-solid state out-of-plane Nd: YAG ring laser of single-frequency operation [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(8):1041~1044
张宽收,张云,谢常德等. 全固化非平面单频 Nd: YAG 环形激光器[J]. *光学学报*, 1996, **16**(8):1041~1044
- 2 Cao Hongjun, Zhang Xuebin, Sun Yimin *et al.*. Diode laser-

- pumped intracavity frequency-doubled Nd:YAG laser of single-frequency operation [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(10): 881~885
曹红军,张学斌,孙一民等. LD抽运的Nd:YAG单频倍频激光器[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(10):881~885
- 3 Zhang Jing, Zhang Kuanshou, Wang Runlin *et al.*. All-solid-state Nd:YVO₄ ring laser of single-frequency operation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(8):694~696
张靖,张宽收,王润林等. 全固态单频Nd:YVO₄环形激光器[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(8):694~696
 - 4 Cui Fuyun, Wang Haibo, Ma Yan *et al.*. Frequency-stabilized high power Nd:YVO₄ ring single-frequency laser end-pumped by diode laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3):271~273
崔芙云,王海波,马艳等. 激光二极管抽运的高输出单频稳频Nd:YVO₄激光器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(3):271~273
 - 5 Zheng Wenqiang, Bi Zhiyi, Luo Ming *et al.*. Application of ¹²⁷I₂ Doppler-broadened FM spectroscopy to frequency stabilization of mini-Nd:YVO₄ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2): 161~163
郑文强,毕志毅,罗明等. ¹²⁷I₂频率调制光谱在微型Nd:YVO₄激光稳频中的应用[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(2):161~163
 - 6 T. J. Kane, R. L. Byer, B. K. Zhou. Monolithic single-mode Nd:YAG ring laser [C]. CLEO'84, USA, Digest, WM3, 1984. 114~116
 - 7 Thomas J. Kane, Robert L. Byer. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2): 65~67
 - 8 E. A. P. Cheng, T. J. Kane. High-power single-mode diode-pumped Nd:YAG laser using a monolithic nonplanar ring resonator [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(7):478~480
 - 9 I. Freitag, A. Tunnerman, H. Welling. Power scaling of diode-pumped monolithic Nd:YAG lasers to output powers of several Watts [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **115**:511~515
 - 10 Zang Erjun, Cao Jianping, Zhong Mingchen *et al.*. Outpower and frequency stability of monolithic semi-nonplanar ring lasers [C]. *SPIE*, 2002, **4914**:276~279
 - 11 Zang Erjun, Cao Jianping, Zhong Mingchen *et al.*. Stable second harmonic generation using a monolithic ring laser and an external ring cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3):335~340
臧二军,曹建平,钟明琛等. 用单块激光器和环形外腔获得稳定的532 nm激光[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3):335~340
 - 12 Ady Arie, Robert L. Byer. Laser heterodyne spectroscopy of ¹²⁷I₂ hyperfine structure near 532 nm [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(11):1990~1997
 - 13 Feng-Lei Hong, Jun Ishikawa. Hyperfine structures of the R(122)35-0 and P(84)33-0 transitions of ¹²⁷I₂ near 532 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **183**:101~108
 - 14 Ady Arie, Stephan Schiller, Eric K. Gustafson *et al.*. Absolute frequency stabilization of diode-laser-pumped Nd:YAG lasers to hyperfine transitions in molecular iodine [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(17):1204~1206
 - 15 Ady Arie, Robert L. Byer. Frequency stabilization of the 1064-nm Nd:YAG lasers to Doppler-broadened lines of iodine [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(36):7382~7386
 - 16 M. L. Eickhoff, J. L. Hall. Optical frequency standard at 532 nm [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1995, **44**(2):155~158
 - 17 Feng-Lei Hong, Jun Ishikawa. A compact I₂-stabilized Nd:YAG laser [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, **36**(Part 1, 7A): 196~198
 - 18 A. Owyong, P. Esherick. Stress-induced tuning of a diode-laser-excited monolithic Nd:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(12):999~1001
 - 19 T. J. Kane, E. A. P. Cheng. Fast frequency tuning and phase locking of diode-pumped Nd:YAG ring lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(11):970~972
 - 20 Erjun Zang, Jianping Cao, Mingchen Zhong *et al.*. Relaxed alignment tolerance of monolithic ring lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(33):7012~7017