

## 窄线宽低噪声可调谐非平面环形激光器

王云祥, 邱 琪, 梁 旭, 邓珠峰

(电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054)

**摘 要:** 针对空间相干光通信和探测等应用, 对非平面环形激光器的线宽、噪声和调谐特性进行了系统的实验研究。单频输出功率达到 752 mW, 光光效率 42%, 斜率效率 54%。采用延时自外差拍频法测试了激光线宽, 其随泵浦功率的增加而增大, 输出功率小于 200 mW 时, 线宽小于 1 kHz, 在最高输出功率下线宽为 2.3 kHz。激光强度噪声主要由弛豫振荡引起, 相对强度噪声(RIN)随着泵浦功率的提高而降低。在 1.78 W 泵浦功率下, RIN 达到 -93 dB/Hz。采用温度和压电两种方式进行了激光调谐。温度调谐范围达到 62 GHz。压电调谐范围达到 130 MHz, 响应带宽 100 kHz。

**关键词:** 非平面环形激光器; 窄线宽; 低噪声; 可调谐

**中图分类号:** TN29    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0595-04

## Narrow linewidth low noise tunable nonplanar ring lasers

Wang Yunxiang, Qiu Qi, Liang Xu, Deng Zhufeng

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** For applications in coherent optical communications in space and coherent laser detection, the linewidth, noise and tuning characteristics of nonplanar ring lasers were studied systematically in experiment. The output power in single frequency reached 752 mW, with 42% optical-optical efficiency and 54% slope efficiency. The laser linewidth was measured by delayed self-heterodyne interferometry technique. Linewidth decreased with increased pump power. The linewidth was smaller than 1 kHz with output power smaller than 200 mW, and the linewidth was 2.3 kHz at highest output power. Laser intensity noise was mainly attributed to relaxed oscillation. The relative intensity noise (RIN) decreased with increased pump power. The RIN was -93 dB/Hz at 1.78 W pump power. The laser frequency could be tuned by temperature and PZT. Thermal tuning range reached 62 GHz. PZT tuning range was 130 MHz with 100 kHz response bandwidth.

**Key words:** nonplanar ring laser; narrow linewidth; low noise; tunable

收稿日期: 2012-07-22; 修订日期: 2012-08-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(ZYGX2010J059)

作者简介: 王云祥(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光技术及应用方面的研究。Email: [wangyunxiang@uestc.edu.cn](mailto:wangyunxiang@uestc.edu.cn)

## 0 引言

非平面环形(Nonplanar Ring, NPR)激光器具有线宽窄、噪声低、可调谐、抗失谐特性好等优势,在相干光通信、相干光探测、相干光束合成、引力波检测、时间与频率基准等方面具有广泛的应用<sup>[1-8]</sup>。该类激光器采用单块晶体形成环形腔结构,激光频率对环境扰动的敏感性较低,线宽可达到 kHz 量级。北京理工大学的高春清等人报道了 Nd:YAG NPR 激光器线宽达到 2.84 kHz<sup>[9]</sup>。在噪声研究方面,近年来德国 Innolight 公司在自由运转的 NPR 激光器中获得低于 -100 dB/Hz 的相对强度噪声(Relative Intensity Noise, RIN),采用光电负反馈技术后,噪声抑制幅度达到 40 dB 以上。国内北京交通大学的李焱等人在 1 064 nm NPR 激光器上也得到了 30 dB 的噪声抑制幅度<sup>[10]</sup>。NPR 激光器还可采用温度和压电两种方式进行调谐,压电调谐响应快,但调谐范围小;温度调谐范围大,但响应慢。T. J. Kane 等人在 Nd:YAG NPR 激光器上实现了 100 MHz 的压电调谐范围,响应周期为 15 s<sup>[11]</sup>。国内中国计量科学研究所的臧二军等人也得到了大于 10 MHz 的压电调谐范围<sup>[12]</sup>。在温度调谐方面,德国 Innolight 公司在 Nd:YAG NPR 激光器上获得了 30 GHz 的调谐范围。

文中针对相干光通信和探测方面的应用需求,对非平面环形激光器的线宽、噪声和调谐特性进行系统的实验研究,获得了 1 kHz 的激光线宽和大范围的激光温度和压电调谐性能。

## 1 NPR 激光器结构

单块 NPR 激光器主要由激光晶体和泵浦源构成。激光晶体为 Nd:YAG,尺寸为 3 mm×12 mm×13 mm,如图 1 所示。808 nm 泵浦光由 A 点入射,入射角为 45°。入射面镀膜对泵浦光高透,对 1 064 nm 的 p 光的透过率为 13%,对 s 光的透过率为 4%。激光在晶体内的 B、C、D 点形成全反射,在 A 点部分反射和输出,从而在晶体内形成非平面环形光路。其中 ABD 面与晶体底面平行,BCD 面与 ABD 面所成二面角为 45°。将磁感应强度为 0.4 T 的永磁体靠近晶体,磁场方向如图中所示。由于 B、C、D 点对 s 光和 p 光具有不同的全反射相移,且 A 点上 s 和

p 光的反射系数存在差异,利用晶体的磁致旋光效应,使得晶体内两个传播方向的 4 个本征态产生损耗差,获得单向行波运转,输出单纵模 1 064 nm 激光。泵浦源为 3 W 光纤耦合半导体激光器,光纤芯径为 100 μm,数值孔径为 0.22,光纤输出经泵浦耦合镜会聚输入晶体,晶体内泵浦光腰直径为 175 μm 左右。

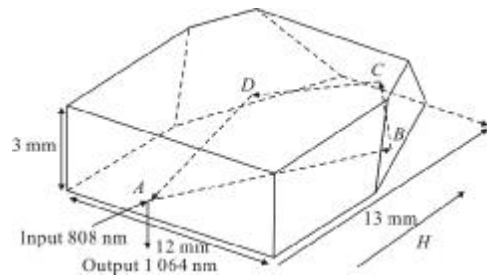


图 1 单块非平面环形晶体结构

Fig.1 Structure diagram of monolithic nonplanar ring crystal

## 2 实验结果

### 2.1 输出功率与单频特性

通过调试泵浦光的角度和光腰位置,使泵浦光和激光达到最佳的模式匹配。1 064 nm 激光输出功率与输入泵浦光功率的关系如图 2 所示。阈值泵浦功率为 0.35 W,斜率效率为 54%,在 1.78 W 泵浦功率下,输出功率达到 752 mW,对应光光效率为 42%。采用 F-P 干涉仪验证了输出激光在不同泵浦功率下均为单纵模。

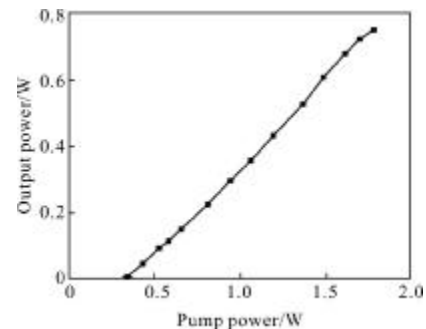


图 2 输出激光功率与泵浦功率的关系

Fig.2 Laser output power versus pump power

采用延时自外差拍频法测量了激光线宽。激光输出通过分光镜分成两束,一束采用光纤延时,延时光纤长度为 24 km。另一束经过相位调制器,调制信号为 10 MHz 正弦波。利用相位调制光的一级边频和

延时光进行拍频,在频谱仪上观察拍频信号的功率谱,激光线宽即为拍频谱半高全宽的一半。图3所示为输出功率为200 mW时相位调制光与延时光的拍频信号的功率谱,从图中可以看出,频谱半高全宽为2 kHz,对应激光线宽为1 kHz。

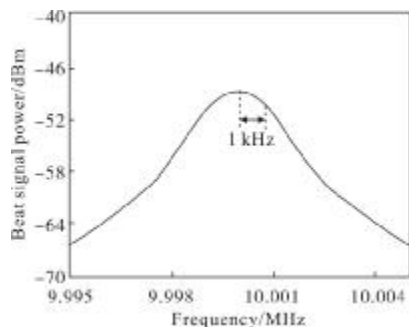


图3 输出功率为200 mW时的激光线宽测试结果  
Fig.3 Linewidth test result at 200 mW output power

图4所示为输出激光线宽与泵浦功率的关系。从图中可以看出,激光线宽随泵浦功率的提高而增大,当输出功率小于200 mW时,线宽小于1 kHz,在1.78 W泵浦功率下,线宽为2.3 kHz。

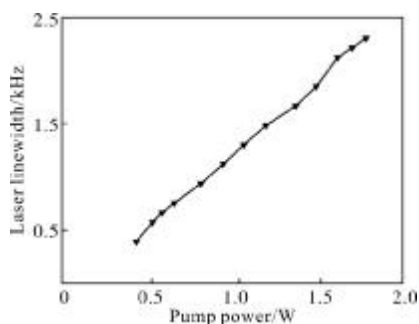


图4 输出激光线宽与泵浦功率的关系  
Fig.4 Laser linewidth versus pump power

## 2.2 激光强度噪声测试与抑制

通过分光的方式使mW量级的1064 nm激光输入InGaAs PIN光电探测器,将光信号转化为电信号,将交流成分输入Anritsu MS2752C频谱分析仪,测量信号功率谱。根据交流信号和直流信号的功率之比计算相对强度噪声(RIN)。实验分析表明激光强度噪声主要来源于弛豫振荡噪声,弛豫振荡频率随泵浦功率的增加近似线性增大。当泵浦功率从0.4 W增加到1.78 W时,弛豫振荡频率从130 kHz增大到500 kHz,远离弛豫振荡频率处的噪声在频谱上迅速减弱,尤其是高频噪声(>2 MHz)迅速趋近于量子噪

声极限。图5所示为相对强度噪声与泵浦功率的关系,从图中可以看出RIN随泵浦功率的增加而近似线性减小。在1.78 W泵浦功率下,RIN达到-93 dB/Hz。

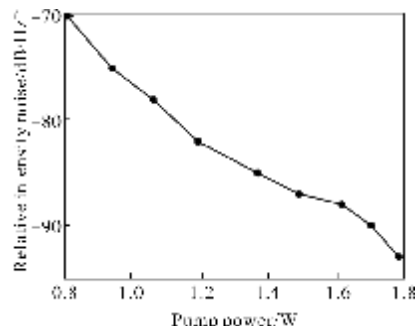


图5 相对强度噪声与泵浦功率的关系

Fig.5 Relative intensity noise versus pump power

采用光电负反馈方式开展了激光噪声抑制实验。将光电探测器输出的电信号通过PID和相位超前电路反馈到LD的驱动电流,形成反馈控制环路。在环路闭合状态下,激光强度噪声得到有效抑制,尤其是弛豫振荡频率处,噪声抑制幅度达到40 dB。

## 2.3 温度和压电调谐

非平面环形激光器可采用温度和压电两种方式进行调谐。通过改变激光晶体的温度,可引起晶体折射率和几何尺寸的微小变化,进而改变输出激光频率。通过热敏电阻采集激光温度,采用TEC作为加热和制冷元件,以PID方式进行温度控制,激光频率采用高精度光谱仪进行测试。当晶体温度在11℃增加到48℃时,频率变化范围超过62 GHz,如图6所示。激光连续调谐范围为8 GHz左右,调谐系数为-3.6 GHz/℃,温度调谐响应周期小于10 s。

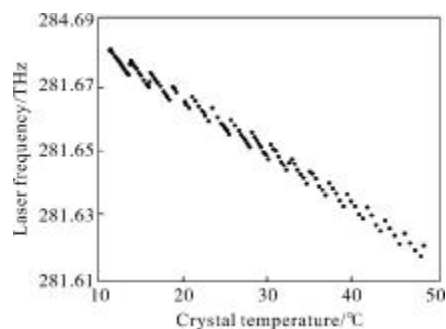


图6 激光频率与晶体温度的关系

Fig.6 Laser frequency versus crystal temperature

将尺寸为14 mm×12 mm×0.5 mm的压电陶瓷片粘接在激光晶体的顶面上,当对压电陶瓷片施加电压驱动信号时,压电陶瓷产生微小的收缩和伸张。由

于将其粘接在晶体的表面,无法自由振动,因此在压电陶瓷内产生应力,该应力传导到晶体内产生应变,引起晶体折射率和几何尺寸的微小变化,进而改变激光频率。对压电陶瓷施加峰峰值为 100 V 的正弦电压驱动信号,将调频激光输出与另一稳频非平面环形激光器的输出进行拍频,在频谱仪上可观察到理想的“马鞍形”展宽,如图 7 所示。从图中可以看出展宽幅度为 130 MHz,对应压电调谐系数为 1.3 MHz/V。测试了 1~100 kHz 范围的压电调谐系数,如图 8 所示。从图中可以看到,调制频率在 100 kHz 以内时压电调谐系数变化在 15% 以内,满足相干光通信等大部分应用的要求。

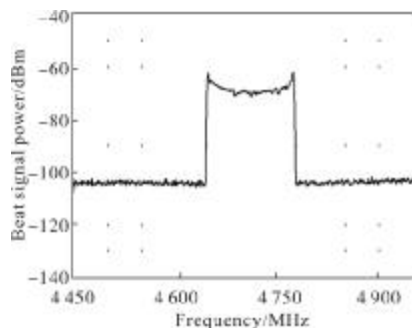


图 7 压电驱动信号峰峰值为 100 V 时的拍频展宽图

Fig.7 Widened beat signal with 100 V PZT driving voltage

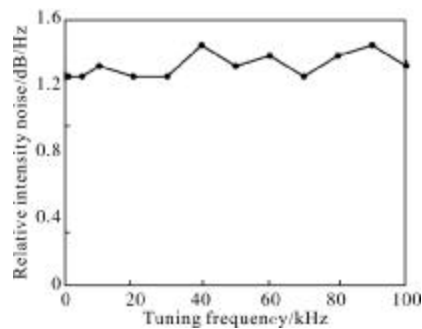


图 8 不同调制频率下的压电调谐系数

Fig.8 PZT tuning coefficient with different modulation frequency

### 3 结 论

研制了低噪声窄线宽可调谐非平面环形激光器,单频输出功率达到 752 mW,斜率效率 50% 以上。激光线宽随着泵浦功率的增加而增大,在最高输出功率下线宽小于 2.5 kHz,输出功率小于 200 mW 时,线宽小于 1 kHz。激光强度噪声随着泵浦功率的增加而降低,在最高输出功率下相对强度噪声达到 -93 dB/Hz,通过光电负反馈可以将强度噪声的幅度降低 40 dB。激光器可以进行温度和压电调谐,温

度调谐范围大,但响应时间长;压电调谐范围小,但响应速度快,在实际应用中两种调谐方式可结合使用,互相配合。

### 参考文献:

- [1] Gregory M, Heine F, Kampfner H, et al. Coherent inter-satellite and satellite-ground laser links [C]//SPIE, 2011, 7923: 0301-0308.
- [2] Gregory M, Heine F, Kampfner H, et al. Inter-satellite and satellite-ground laser communication links based on homodyne BPSK [C]//SPIE, 2010, 7587: E01-E05.
- [3] Smutny B, Kaempfner H, Muehlnikel G, et al. 5.6 Gbps optical intersatellite communication link [C]//SPIE, 2009, 7199: 0601-0608.
- [4] Shaya T M, Member S, Benham V, et al. Self-synchronous and self-referenced coherent beam combination for large optical arrays [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13 (3): 480-486.
- [5] Shaya T M, Benham V, Bakerc J T, et al. First experimental demonstration of selfsynchronous phase locking of an optical array [J]. Optics Express, 2006, 14 (25): 12015-12021.
- [6] Shen Zicai, Cui Yun, Niu Jinchao. Applications and countermeasures of laser technology in space engineering [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41 (10): 2703-2711. (in Chinese)
- [7] Zhou Jian, Wei Guo, Long Xingwu. Research on direction discrimination and low-speed measurement for laser Doppler velocimeter [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41 (3): 632-638. (in Chinese)
- [8] Yang Yi, Ding Quanxin, Zhang Chunfeng. New advances in airborne laser imaging techniques [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(4): 620-625. (in Chinese)
- [9] Gao Chungqing, Gao Mingwei, Lin Zhifeng et al. LD pumped monolithic non-planar ring resonator single frequency lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1704-1709. (in Chinese)
- [10] Li Ye, Li Wenbo, Li Mishan et al. Suppression of the intensity noise in solid Nd: YAG lasers by optoelectronic feedback [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2005, 29(3): 9-12. (in Chinese)
- [11] Kane T J, Cheng E A. Fast frequency tuning and phase locking of diode-pumped Nd: YAG ring lasers [J]. Optics Letters, 1988, 13(11): 970-972.
- [12] Zang Erjun, Cao Jianping, Li Chengyang, et al. Experimental investigation of fast frequency tuning on monolithic semi-nonplanar ring lasers with PZT [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(8): 931-934. (in Chinese)