

激光二极管抽运的单块非平面环形腔可调谐单频激光器

鲁远甫^{1,2} 宗楠² 薄勇² 谢仕永² 冯广智¹ 金雷¹
彭钦军² 崔大复² 许祖彦²

(¹中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055
²中国科学院理化技术研究所激光物理与技术研究中心, 北京 100190)

摘要 报道了激光二极管(LD)抽运的单块非平面环形腔可调谐单频激光器的实验结果。采用 LD 抽运单块非平面环形腔 Nd:YAG 激光晶体,分别获得了 1080 mW 和 580 mW 的 1064 nm 和 1319 nm 激光输出,对应的光-光转换效率分别为 40.9% 和 14.3%。用法布里-珀罗(F-P)扫描法测量了激光的输出模式及线宽,对应的两种输出均为单横模、单纵模运作,其线宽分别为 $\Delta\nu_{1064\text{ nm}} = 41\text{ MHz}$ 和 $\Delta\nu_{1319\text{ nm}} = 150\text{ MHz}$ 。对两种输出的光束质量进行了测量,其光束质量因子分别为 $M_{1064\text{ nm}}^2 = 1.14$ 和 $M_{1319\text{ nm}}^2 = 1.15$ 。对两种激光的温度调谐特性进行了测量,1064 nm 单频激光的调谐范围 48.2 GHz,平均调谐精度 1.42 GHz/°C;1319 nm 单频激光的调谐范围 12.7 GHz,平均调谐精度 2.92 GHz/°C。

关键词 激光器;单频激光;非平面环形腔;频率调谐

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.s100311

LD Pumped Monolithic Non-Planar Ring Resonator Tunable Single Frequency Lasers

Lu Yuanfu^{1,2} Zong Nan² Bo Yong² Xie Shiyong² Feng Guangzhi¹ Jin Lei¹
Peng Qinjun² Cui Dafu² Xu Zuyan²

(¹ Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China
² Research Centre of Laser Physics and Technique, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Experimental results of laser diode (LD) pumped monolithic non-planar ring resonator (NPRO) tunable single frequency lasers are reported. 1064 nm and 1319 nm lasers with the power of 1080 mW and 580 mW are obtained by LD pumped monolithic NPRO Nd:YAG crystal, whose corresponding optical-optical efficiencies are 40.9% and 14.3%, respectively. The longitudinal mode and the linewidth of the lasers are measured using the scanning Fabry-Perot interferometer, which shows both of the two lasers are operating in single longitudinal and fundamental transverse mode, the linewidth of the two lasers are $\Delta\nu_{1064\text{ nm}} = 41\text{ MHz}$ and $\Delta\nu_{1319\text{ nm}} = 150\text{ MHz}$, respectively. The beam quality of the two single frequency laser are measured by a beam quality analysis, which shows the beam quality factor are $M_{1064\text{ nm}}^2 = 1.14$ and $M_{1319\text{ nm}}^2 = 1.15$, respectively. The frequency tuning of the single frequency lasers are also studied by adjusting the temperature of the crystal. The maximal tuning range of 1064 nm laser is about 48.2 GHz with a average tuning coefficient of 1.42 GHz/°C; the maximal tuning range of 1319 nm laser is about 12.7 GHz with a average tuning coefficient of 1.42 GHz/°C.

Key words laser; single frequency laser; non-planar ring resonator; frequency tuning

OCIS codes 140.3560; 140.3570; 140.3580; 140.3600

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(60508013)资助课题。

作者简介: 鲁远甫(1981—),男,博士,助理研究员,主要从事全固态激光器及其非线性频率变换方面的研究。

E-mail: yf.lu@siat.ac.cn

1 引言

可调谐单频激光器在光学计量、相干探测、光纤传感和激光雷达等领域都有广泛而重要的应用^[1-4]。激光二极管(LD)抽运的单向行波环形腔激光器由于具有效率高、寿命长、结构紧凑和性能稳定等优点,已成为近年来人们获取可调谐单频激光输出的优选方案。目前主要通过LD抽运单块非平面环形腔(NPRO)^[5,6]及LD抽运多镜环形腔等方式^[7,8]来获取稳定的可调谐单频输出,后者一般输出功率较高,但由于需在腔内插入单向器、波片、标准具等光学元件,会导致激光器的稳定性变差,系统也更复杂。前者虽输出功率略小,但由于采用了一体化的结构,且谐振腔增益体积较大,因而具有结构紧凑,稳定性高,效率高,线宽窄,光束质量好的优势。国际上单块非平面单向环形腔单频固体激光器由Freitag等^[9,10]提出并开展了大量研究。在国内,哈尔滨工业大学^[4]、北京理工大学^[11]、清华大学^[12]等单位也报道了相关的结果,从不同的角度对这类激光器的性能进行了研究。

本文报道了LD抽运单块非平面环形腔激光器的实验结果。采用LD端面抽运单块非平面环形腔Nd:YAG激光晶体,分别获得了1064 nm和1319 nm的可调谐单频激光器。

2 基本原理

单块非平面环形腔输出单频激光的原理,是利用光波在腔内非平面光路上不同空间取向的全反射面上产生相位延迟,也就是使等效波片的主轴方向和偏振反射镜的主轴方向不相同,再由外加磁场引入的法拉第旋光效应使正向和反向传播的光线具有不同的本征偏振态和本征值,通过在输出耦合面上镀膜使不同方向的偏振光具有不同的反射系数,最终只让一个传播方向的某一偏振态起振而实现单向行波振荡,最后通过模式竞争实现均匀展宽Nd:YAG的激光器单纵模运转。通过对激光增益介质的温度进行控制,从而可以改变腔长,实现对激光波长的调谐。

目前国际上流行的单块非平面单向行波环形腔如图1所示,A点既是抽运光的入射点,又是振荡激光的输出点,光在B、C、D 3点全反射。在单块晶体中沿A、B、C、D振荡的光线形成非平面环形腔的结构形式。A点的介质膜不仅要抽运光高透,还要对振荡光的s偏振光和p偏振光有不同的透射率

(相当于一个检偏器)以起到选择输出单频的作用。由外加磁场(磁场方向如图所示)引入的法拉第旋光效应可保证腔内只有沿某一方向的一个偏振态的光起振,从而保证单频振荡。

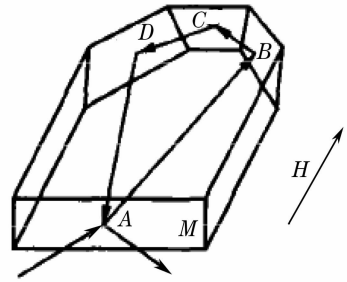


图1 单块非平面环形腔结构示意图

Fig. 1 Schematic of monolithic non-planar ring cavity

3 实验研究

采用LD抽运单块Nd:YAG晶体非平面环形腔方案研制1064 nm和1319 nm可调谐单频激光器的光路示意图如图2所示。高亮度的808 nm光纤耦合激光器输出的激光通过传输比为1:1的耦合透镜系统抽运单块Nd:YAG晶体。LD模块的光纤芯径为100 μm ,数值孔径 $NA=0.22$ 。对于1064 nm激光,Nd:YAG单块晶体的抽运面镀808 nm增透膜及对1064 nm的s光与p光反射比不同的部分反射膜;对1319 nm激光,为了获得1319 nm的激光振荡,必须抑制Nd:YAG晶体中最强的1064 nm谱线和1319 nm附近的1338 nm谱线的振荡。晶体抽运面镀808 nm和1064 nm增透膜以及对1319 nm的s光与p光反射比不同的部分反射膜,并使1338 nm谱线的透射比高于1319 nm的透射比,以保证1319 nm的激光振荡,防止高增益的1064 nm激光及邻近的1338 nm激光起振。利用光波在非平面腔内不同空间取向的全反射面上的相位延迟,由外加磁场引入的法拉第旋光效应及输出耦合面的偏振反射特性构成光学单向器,从而保证腔内只有沿某一方向的一个偏振态的光起振,消除空间烧孔效应,保证单纵模输出的产生。光路调节上,需仔细调节抽运光射入到抽运面上的位置,以使激光输出功率最高。1064 nm或1319 nm激光在晶体内环形振荡后,由抽运面输出。在Nd:YAG晶体加磁场后(磁场强度约为2200 GA/m),实现单向振荡,激光输出功率可增加近1倍,并获得单频激光输出,当继续增加抽运功率到一定值时,由于增益很高,其他纵模也将振荡,输出成为多纵模激光,因此不能超过这

一抽运功率值。采用自行研制的半导体致冷器 (TEC) 及温控仪对晶体进行高精度温控, 控温精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 可获得稳定的单频激光输出, 当改变晶

体温度时, 由于环形腔的腔长会发生改变, 从而可以实现对激光输出波长的精密调控。

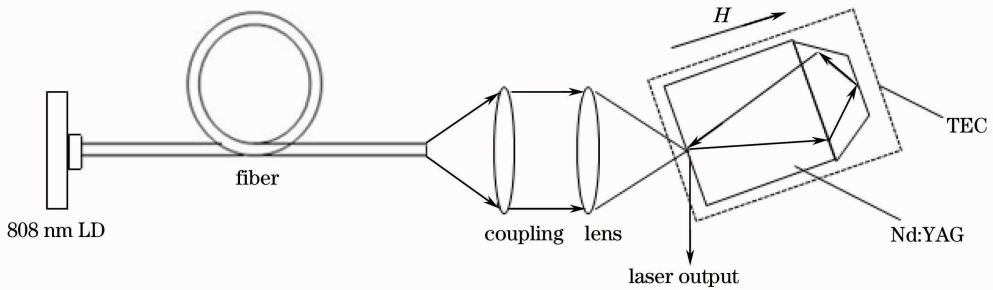


图 2 LD 抽运单块 NPRO Nd:YAG 可调谐单频激光器实验系统示意图

Fig. 2 Experimental setup of LD pumped monolithic NPRO Nd:YAG tunable single frequency laser

研制的 1064 nm 和 1319 nm 全固态单频激光器, 其输出功率特性曲线分别如图 3 所示; 从图 3(a) 中可以看出, 当 LD 抽运电流为 10.7 A (抽运功率为 2640 mW) 时, 得到了 1080 mW 的单频 1064 nm 激光输出, 光-光转换效率 40.9%, 从图 3(b) 中可以看出当

LD 抽运电流为 12.7 A (抽运功率为 4060 mW) 时, 得到了 580 mW 的单频 1319 nm 激光输出, 光-光转换效率 14.3%, 当 LD 抽运功率更高时, 将出现多纵模输出。

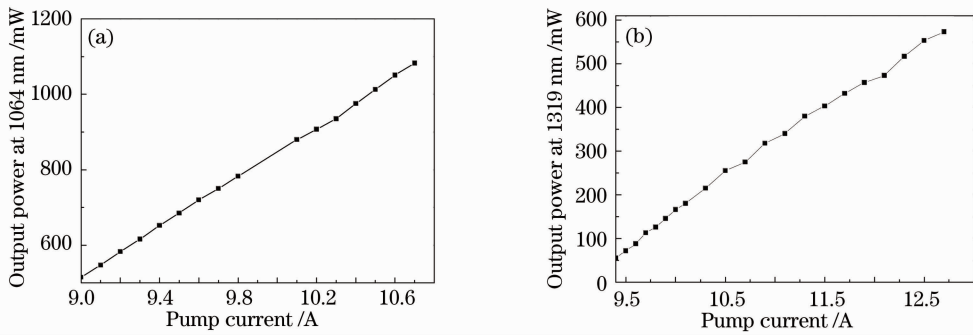


图 3 LD 抽运单块 NPRO Nd:YAG 单频激光器的输出功率曲线。(a) 1064 nm; (b) 1319 nm

Fig. 3 Output power of LD pumped monolithic NPRO Nd:YAG single frequency laser. (a) 1064 nm; (b) 1319 nm

采用自由光谱区为 7.5 GHz、精细度为 200 的共焦球面扫描干涉仪测量了最高单频输出时单频激光器的纵模模式, 结果如图 4 所示。可以看出在一个自由光谱扫描范围内, 两个激光器分别只有一个纵模振荡, 由此说明了激光器为单纵模运转。由于图中两个峰之间即为一个自由光谱区, 通过计算每

个峰的宽度与两个峰之间的宽度的比, 可以得出 1064 nm 单频激光与 1319 nm 单频激光的线宽分别约为 41 MHz 和 150 MHz。

采用 M^2 -200 型光束质量分析仪测得的单频激光器的光束质量及光斑图样如图 5 所示。由图 5(a) 可知, 1064 nm 单频激光的水平 and 垂直方向的光束

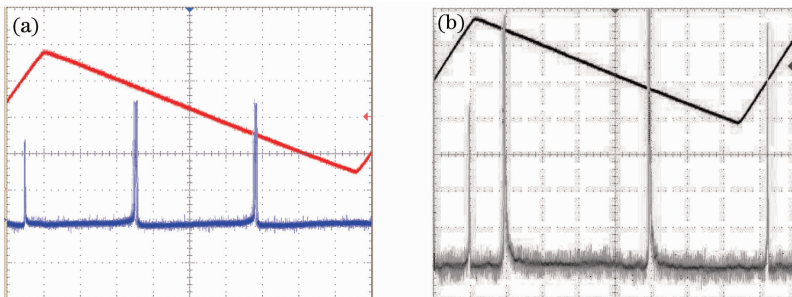


图 4 LD 抽运单块 NPRO Nd:YAG 单频激光器的纵模模式。(a) 1064 nm; (b) 1319 nm

Fig. 4 Output spectrum of LD pumped monolithic NPRO Nd:YAG single frequency laser. (a) 1064 nm; (b) 1319 nm

质量分别为 $M_x^2 = 1.15$ 和 $M_y^2 = 1.13$, 对应的光束质量 $M^2 = 1.14$; 由图 5(b) 可知, 1319 nm 单频激光的水平 and 垂直方向的光束质量分别为 $M_x^2 = 1.17$ 和

$M_y^2 = 1.14$, 对应的光束质量 $M^2 = 1.15$ 。可以看出, 两束激光均为基横模运转且光束质量已近衍射极限。

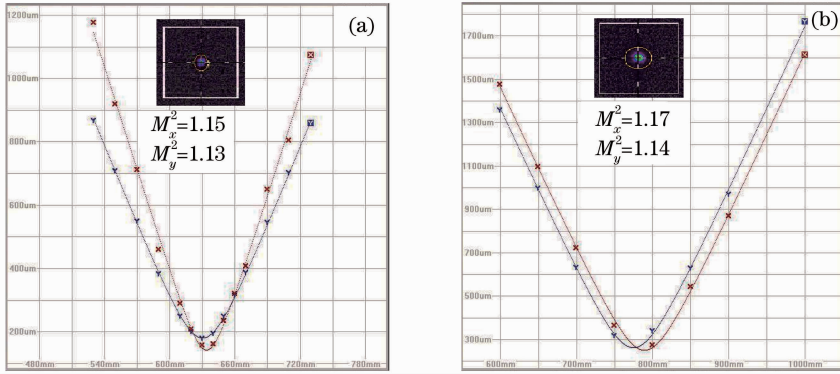


图 5 LD 抽运单块 NPRO Nd:YAG 单频激光器的光束质量。(a) 1064 nm; (b) 1319 nm

Fig. 5 Beam quality of LD pumped monolithic NPRO Nd:YAG single frequency laser. (a) 1064 nm; (b) 1319 nm

在保证激光器单频运转的情况下, 研究了激光器的波长调谐特性。当改变单块激光晶体的温度时, 激光晶体的尺寸会发生变化, 从而实现对激光输出波长的调谐, 调谐精度与控温精度成正比。分别采用 WS-7 及 WS-5 型高精度波长计测得的 1064 nm 单频激光与 1319 nm 单频激光的波长调谐特性如图 6 所示。如图 6(a), 当单块激光晶体的温度由 16 °C ~ 50 °C 变化时, 1064 nm 激光的波长扫过

1064.430 ~ 1064.612 nm, 调谐范围为 0.182 nm, 即 48.2 GHz, 平均调谐精度 5.35 pm/°C, 即 1.42 GHz/°C; 如图 6(b) 所示, 当单块激光晶体的温度由 54 °C ~ 65 °C 变化时, 1319 nm 激光的波长扫过 1319.115 ~ 1319.189 nm, 调谐范围 0.074 nm, 即 12.7 GHz, 平均调谐精度 17 pm/°C, 即 2.92 GHz/°C。调谐曲线虽然大致成线性关系, 但可看到其中有一些折线, 这是由于温度变化时激光跳模所致。

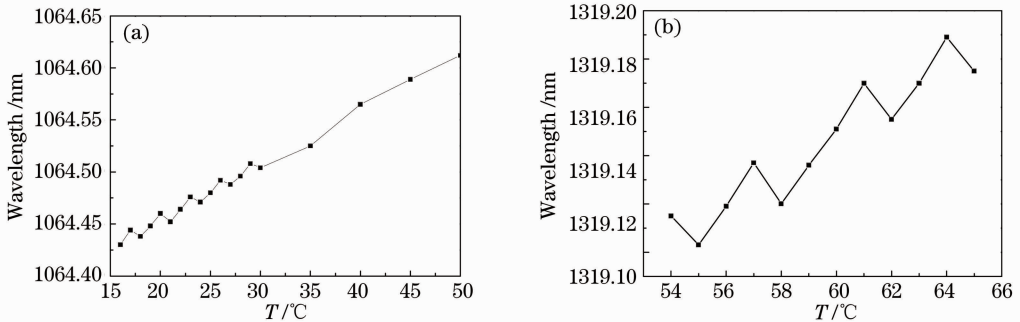


图 6 LD 抽运单块 NPRO Nd:YAG 单频激光器的波长调谐曲线。(a) 1064 nm; (b) 1319 nm

ig. 6 Wavelength tuning curve of LD pumped monolithic NPRO Nd:YAG single frequency laser. (a) 1064 nm; (b) 1319 nm

4 结 论

通过 LD 端面抽运单块 Nd:YAG 非平面环形腔的实验研究, 分别获得了 1064 nm 和 1319 nm 的可调谐单频输出, 并对其相关激光参数进行了测量。1064 nm 激光器最大单频输出 1080 mW, 光-光转换效率 40.9%, 线宽 41 MHz, 光束质量 $M^2 = 1.14$, 调谐范围 48.2 GHz, 平均调谐精度 1.42 GHz/°C; 1319 nm 激光器最大单频输出 580 mW, 光-光转换效率 40.9%, 线宽 150 MHz, 光束质量 $M^2 = 1.15$, 调谐范围 12.7 GHz, 平均调谐精度 2.92 GHz/°C。

最后, 将此激光器进行了工程化设计及封装, 以便于在以后的实验中使用。

参 考 文 献

- 1 Zhao Yan, Gao Chunqing, Cao Yilei *et al.*. Study on laser-diode-pumped 1319 nm single frequency laser tuning and noise suppression[J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(5): 466~468
- 2 赵 严, 高春清, 曹一磊 等. LD 抽 1319 nm 单频激光器的调谐和噪声抑制研究[J]. *激光技术*, 2004, **28**(5): 466~468
- 3 Zhang Xiuyong, Gao Mingwei, Gao Chunqing. Suppression of the intensity noise of monolithic non-planar ring oscillator laser [J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(5): 774~777
- 4 张秀勇, 高明伟, 高春清. 单块非平面环形腔激光器的强度噪声

- 抑制技术研究[J]. 光学技术, 2008, **34**(5): 774~777
- 3 Wang Xin, Yang Suhui, Sun Wenfeng *et al.*. Laser diode pumped high-slope-efficiency monolithic unidirectional single frequency ring laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 149~152
王欣, 杨苏辉, 孙文峰等. 激光二极管抽运单块高斜度效率环形腔单频固体激光器[J]. 中国激光, 2005, **32**(2): 149~152
- 4 Yao Baoquan, Duan Xiaoming, Fang Dan *et al.*. 7.3 W of single-frequency output power at 2.09 μm from an Ho:YAG monolithic nonplanar ring laser[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(18): 2161~2163
- 5 Gao Chunqing, Gao Mingwei, Lin Zhifeng *et al.*. LD pumped monolithic non-planar ring resonator single frequency lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1704~1709
高春清, 高明伟, 林志锋等. LD抽运单块非平面环形腔单频激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1704~1709
- 6 T. J. Kane, R. L. Byer. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser[J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2): 65~67
- 7 Zhao Weifang, Hou Wei, Li Gang. Single-frequency Nd:YAG ring laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2810~2812
赵伟芳, 侯玮, 李港等. Nd:YAG 环形腔单频激光器[J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2810~2812
- 8 Zhang Tieli, Yao Jianquan, Wang Peng *et al.*. Laser diode end-pumped, high power continuous wave single frequency Nd:YVO₄ ring laser at 1064 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1194~1197
张铁犁, 姚建铨, 王鹏等. 端面抽运高功率连续单频 1064 nm Nd:YVO₄ 环形腔激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1194~1197
- 9 I. Freitag, A. Tunnermann, H. Welling. Power scaling of diode-pumped monolithic Nd:YAG lasers to output powers of several watts[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **115**(5-6): 511~515
- 10 Zang Erjun, Cao Hongjun, Zhao Kun *et al.*. Investigation of monolithic quasi-planar ring lasers [C]. *SPIE*, 1998, **3549**: 29~34
- 11 Wang Qin, Gao Chunqing, Wei Guanghui. Analysis of monolithic nonplanar ring oscillators by considering the stress-induced birefringence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 279~283
王青, 高春清, 魏光辉. 考虑晶体应力情况下的单块非平面环形腔分析[J]. 光学学报, 2004, **24**(2): 279~283
- 12 Gong Ke, Wu Keying, He Shufang. 473 nm single-frequency operation of corner cube based solid-state non-planar ring cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3049~3051
巩轲, 吴克瑛, 何淑芳. 角锥型全固态非平面环形激光器 473 nm 单频运转[J]. 光子学报, 2009, **38**(12): 3049~3051