

文章编号:1002-2082(2014)02-0332-04

用声光调制器实现的1 W Nd : YAG 单纵模环形激光器

连天虹¹,王石语¹,刘国荣²,王一斌³,蔡德芳¹,李兵斌¹,过振¹

(1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院,陕西 西安 710071;

2. 总装备部西安军代局,陕西 西安 710032;3. 西安科技大学 理学院,陕西 西安 710054)

摘要:鉴于单向环形腔是目前获得较大功率单纵模激光最有效的方式之一,为使环形腔单向运行,需要在环形腔内插入对正反2个方向的光产生损耗差的光学元件。采用激光二极管泵浦Nd : YAG晶体,用声光调制器作为光学二极管使环形腔单向运行,实现四镜矩形环形腔单纵模激光器。实验中谐振腔的稳定性由增益介质的热透镜保证,声光调制器给正反2个方向的光提供损耗差,这使得在竞争过程中有较大损耗的光不能运行从而获得单向输出。实验获得了连续功率1 W、光束质量因子 M^2 为1.21的1.06 μm单纵模激光。

关键词:激光器;单纵模;声光调制器

中图分类号: 文献标志码:A doi:10.5768/JAO201435.0207001

1 W Nd-YAG single-longitudinal-mode ring laser using acousto-optic modulator

LIAN Tian-hong¹, WANG Shi-yu¹, LIU Guo-rong², WANG Yi-bin³, CAI De-fang¹,
LI Bing-bin¹, GUO Zhen¹

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Xi'an Military Representatives Bureau of General Armaments Department, Xi'an 710032, China;

3. College of Sciences, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Using unidirectional ring resonator is the most promising way to get high power single-longitudinal-mode (SLM) laser output. To enforce the single-longitudinal-mode ring cavity to operate unidirectionally, a component which can introduce loss difference between the counter-propagating beams in the cavity is necessary. A diode-pumped Nd : YAG SLM four-mirror rectangle ring laser was experimentally demonstrated. The stability of the cavity was ensured by the thermal of the gain medium, and an intra-cavity acousto-optic modulator was used as the optical diode, which provided different losses on the counter-propagating beams. The beam with larger loss died out in their competition for the gain and hence the unidirectional operation was demonstrated. An SLM output power of 1 W at 1.06 μm with a beam quality factor M^2 of 1.21 was obtained. The considerable increased output power and compact architecture are especially important for future practical application.

Key words: laser; single-longitudinal-mode; acousto-optic modulator

引言

单纵模固体激光器在相干激光雷达、相干光

通信、非线性频率产生等领域有重要的应用。

固体激光器获得单纵模输出的方式有短腔法、扭摆

收稿日期:2013-08-19; 修回日期:2013-11-19

基金项目:中央高校基本科研业务费资助课题(72124698)

作者简介:连天虹(1984—),男,甘肃会宁人,博士研究生,主要从事固体激光器方面的研究工作。E-mail:tianhongl@126.com

模法、腔内插入标准具法、单向运行环形腔法、单块非平面环形腔(NPRO)等^[1]。2009年,北京理工大学林志峰等人用激光二极管(LD)抽运厚度为1 mm的Cr,Tm,Ho : YAG 微片激光介质,获得了31 mW的单纵模激光输出^[2]。2012年,北京理工大学C.Gao 等人用L型扭摆腔法获得了Tm : YAG晶体的2 μm 单频输出,输出功率1.46 W^[3]。2011年,B. Q. Yao 等人用Ho : YAP作为激光介质,在腔内插入2个标准具,通过调整标准具角度,在室温下分别获得了72.6 mW的2 102.5 nm单频激光和42.0 mW的2 130.8 nm单频激光^[4]。2013年,北京理工大学Wang Lei 等人用Tm : LuAG 激光介质,在腔内插入标准具获得了2 μm 可调谐激光输出^[5]。2010年,华北光电技术研究所陈三斌等人用LD单端抽运Nd : YVO4 晶体,采用四镜环形腔,在22.5 W抽运功率下获得了9.9 W 的1 064 nm单频激光输出^[6]。NPRO 激光器由于采用单块结构,具有极高的频率稳定性,北京理工大学高春清等人对其进行了深入研究。2009年,他们采用LD抽运单块NPRO Nd : YAG 激光器和单块键合晶体Tm : YAG 激光器,分别获得了7.876 W 和616 mW 的1 064 nm 和1 319 nm 的单频激光输出;用LD抽运NPRO Tm : YAG 激光器,获得了878 mW 的2 μm 单频激光输出^[7]。2012年,他们用1 532 nm 光纤激光器抽运Er : YAG 单块NPRO,获得了6.1 W 1 645 nm 单频输出^[8],2013年,他们将功率提高到10.5 W^[9]。他们还用Ho : YAG 单块NPRO 获得了8.0 W 的2 122 nm单频激光输出^[10]。

单向环形腔法是获得大功率单纵模激光最有效的方式之一。单向运行的行波腔消除了增益介质中由于驻波效应产生的空间烧孔效应,增益饱和效应使其单纵模输出。通常利用法拉第磁光效应使环形腔单向运行,对分离器件的环形腔,通常要在腔内插入法拉第光隔离器;对单块非平面环行腔,需外部对介质提供磁场。另一种使环形腔单向运行的方式是采用声光调制器。R. Roy 等用该技术在环形腔中获得Ti : sapphire 激光的单纵模输出^[11]。L. J. Bromley 等人用声光调制器实现了单向输出和调Q的Nd : YAG 激光器^[12],获得了重复频率1 kHz、单脉冲能量13 μJ 的脉冲输出,对应的平均功率为13 mW。D. Y. Shen 等人用声光调制器在环形腔中实现了单频 Ho : YAG

激光器,获得了3.7 W 2 114 nm 激光输出^[13]。声光调制器作为光学单向器具有插入损耗小、结构紧凑、体积小等优点。目前报道的用该技术获得的1.06 μm Nd : YAG 激光的功率仅为几十毫瓦,不能满足实际应用的需求。本文在四镜环形腔中用声光调制器作为单向器获得了Nd : YAG 单纵模激光,提高了输出功率水平,以满足实际应用需要。

1 实验装置

实验装置如图1所示。谐振腔采用四镜矩形环形腔,反射镜M1~M4 均为平镜,M1、M2 和M3 在45°入射时对激光波长1 064 nm 全反,M3 对808 nm 泵浦光全透,M4 为输出耦合镜,45°入射时对1 064 nm 激光的透过率为15%。M1与M2 及M3 与M4 间的距离为15 cm,M2 与M3 即M1 与M4 间的距离为12 cm,谐振腔长为54 cm。较长的腔长有利于基横模输出,平面反射镜能减弱斜入射产生的像散。实验中所用Nd : YAG 增益介质大小为Φ2×20 mm³,用钢皮包裹并夹持在铝热沉中散热冷却。泵浦源为光纤耦合激光二极管,其在25 °C的中心波长为808 nm。泵浦光经耦合系统整形后端面泵浦激光介质。

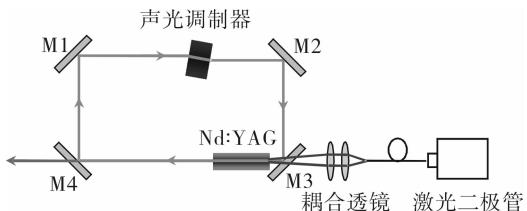


图1 实验装置框图

Fig. 1 Scheme of experimental setup

实验中所用声光调制器(AOM)由熔融石英制成,其对环形腔中2个方向传播的光产生损耗差。Clarkson给出了该损耗差产生的机理^[14],由于2个方向的光束和声波的相对夹角不同,经运动的声波面反射后会产生不同的多普勒频移,从而导致2个方向的光具有不同的布拉格角,因此在一定角度入射时声光调制器对2束光有不同的衍射损耗,具有较大损耗的光束在竞争中处于劣势而不能持续振荡,衍射损耗较小方向的光束能够持续振荡,从而获得单向输出。

由于增益介质的热效应会影响谐振腔的稳定性,在该谐振腔设计中我们考虑了热透镜效应。

在端面高斯光泵浦结构中,热效应可以近似为 1 个透镜,其等效焦距可以表示为^[15]

$$f = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{\eta P (dn/dT)} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l_c)} \right] \quad (1)$$

式中: K_c 为增益介质的导热系数; ω_p 为泵浦光半径; η 为产热系数; P 为泵浦功率; dn/dT 为介质折射率随温度的变化率; α 为介质对泵浦光的吸收系数; l_c 为介质长度。实验中使用的 Nd : YAG 晶体的相关参数值: $K_c = 0.14 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$; $\omega_p = 0.5 \text{ mm}$; $\eta = 0.32$; $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; $\alpha = 0.5 \text{ mm}^{-1}$; $l_c = 2 \text{ cm}$ 。谐振腔的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-l/f & l \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 l 为谐振腔长度,要使谐振腔稳定,需满足 $-1 < (A+D)/2 < 1$,即谐振腔长度需满足 $0 < l < 4f$ 。代入相关参数,在最大泵浦功率时有最小焦距 26 cm,而谐振腔长为 54 cm,保证了谐振腔的稳定性。

2 实验结果

图 2 所示为输出光功率随泵浦光功率的变化。可以看出,随着泵浦功率增大,输出功率随泵浦功率以接近线性的形式增加,但在泵浦功率 13 W 时,曲线发生弯曲。在理想情况下,光泵单纵模激光器的输出功率随吸收的泵浦功率线性变化。但实际上,在泵浦功率变化时,激光二极管的管芯温度通常都会发生微小变化,使泵浦光的中心波长产生漂移,从而影响其与激光介质的光谱匹配程度,使激光输出功率随泵浦功率的变化趋势偏离线性;另一个会影响该变化趋势的原因是激光介质的热效应引起的热致衍射损耗,随着泵浦功率的变化,热致衍射损耗发生变化,即在泵浦功率变化时,谐振腔的损耗也在发生变化。这两方面因

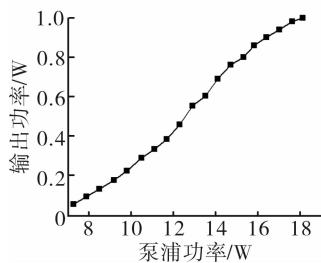


图 2 输出功率随泵浦光功率的变化

Fig. 2 Output power versus optical pump power

素通常会使光泵激光器输出功率随泵浦功率的变化趋势偏离线性。在 18.1 W 泵浦时,获得了 1 W 的激光输出。

对应于 54 cm 腔长的纵模间隔为 0.56 GHz,用自由光谱区为 4 GHz 的共焦球面扫描干涉仪测量输出激光的纵模,测量结果如图 3 所示。可见,激光器为单纵模输出。

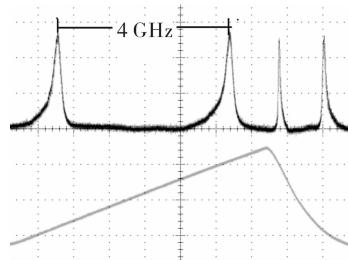


图 3 输出激光的纵模结构

Fig. 3 Output spectra of laser

用刀口法测量了距输出镜不同位置处的光斑半径,用最小二乘法拟合了光斑半径随距离的变化,结果如图 4 所示。进而计算出光束质量因子 M^2 为 1.21,可见激光器为近基横模输出。

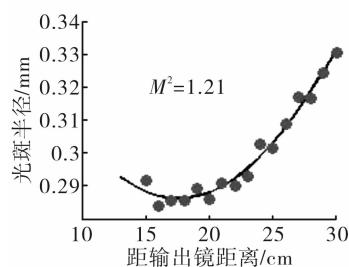


图 4 光斑半径随距离的变化

Fig. 4 Beam radius versus distance from output coupler

3 结论

本文用声光调制器给环形腔中 2 个方向的光提供损耗差使四镜环形腔单向运行从而实现单纵模输出。实验获得了输出功率 1 W 的 $1.06 \mu\text{m}$ Nd : YAG 单纵模激光,光束质量因子 M^2 为 1.21。该输出功率及其紧凑的结构能满足许多重要的应用需要。

参考文献:

- [1] 王然,高春清. $1.6 \mu\text{m}$ 波段单频激光器技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8):080006-1-7.

- WANG Ran, GAO Chun-qing. Progress of 1.6 μm region single-frequency lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Preress*, 2013, 50(8):080006-1-7. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 林志峰,张云山,高春清,等. LD 抽运 Cr, Tm, Ho : YAG 微片激光器单纵模运转特性的研究[J]. 物理学报,2009, 58(3):1689-1693.
- LIN Zhi-feng, ZHANG Yun-shan, GAO Chun-qing, et al. Experimental investigation of LD-pumped Cr, Tm, Ho : YAG single longitudinal mode microchip laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58 (3): 1689-1693. (in Chinese with an English abstract)
- [3] GAO C, WANG R, LIN Z, et al. 2 μm single-frequency Tm : YAG laser generated from a diode-pumped L-shaped twisted mode cavity[J]. *Applied Physics B*, 2012, 107(1):67-70.
- [4] YAO B Q, CHEN F, ZHANG C H, et al. Room temperature single-frequency output from a diode-pumped Tm, Ho : YAG laser[J]. *Optics Letters*, 2011,36(9):1554-1556.
- [5] WANG Lei, GAO Chun-qing, GAO Ming-wei, et al. Diode-pumped 2 μm tunable single-frequency Tm: LuAG laser with intracavity etalons[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(6):1272-1275.
- [6] 陈三斌,周寿桓,赵鸿,等. 高效率连续环形腔单频激光器[J]. 中国激光,2010, 37(9):2309-2313.
- CHEN San-bin, ZHOU Shou-huan, ZHAO Hong, et al. High efficiency continuous-wave ring cavity single-frequency laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9):2309-2313. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 高春清,高明伟,林志峰,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.
- GAO Chun-qing, GAO Ming-wei, LIN Zhi-feng, et al. LD pumped monolithic non-planar ring resonator single frequency lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7):1704-1709. (in Chinese with an English abstract)
- [8] GAO Chun-qing, ZHU Ling-ni, WANG Ran, et al. 6.1 W single frequency laser output at 1645 nm from a resonantly pumped Er : YAG nonplanar ring oscillator[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11):1859-1861.
- [9] WANG Ran, GAO Chun-qing, ZHENG Yan, et al. A resonantly pumped 1645 nm Er : YAG nonplanar ring oscillator with 10.5 W single frequency output [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25 (10):955-957.
- [10] WANG Lei, GAO Chun-qing, GAO Ming-wei, et al. Resonantly pumped monolithic nonplanar Ho : YAG ring laser with high-power single-frequency laser output at 2 122 nm[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8):9541-9546.
- [11] ROY R, SCHULZ P A, WALTHE A. Acousto-optic modulator as an electronically selectable unidirectional device in a ring laser[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(9):672-674.
- [12] BROMLEY L J, HANNA D C. Single-frequency Q-switched operation of a diode-laser-pumped Nd : YAG laser using an acousto-optic modulator[J]. *Optics Letters*, 1991,16(6):378-380.
- [13] SHEN D Y, CLARKSON W A, COOPER L J, et al. 3.7-Watt single-frequency cw Ho : YAG ring laser end-pumped by cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser[C]. Santa Fe: OSA/Advanced Solid-State Photonics, 2004.
- [14] CLARKSON W A, NEILSON A B, HANNA D C. Explanation of the mechanism for acousto-optically induced unidirectional operation of a ring laser[J]. *Optics Letters*, 1992,17(8):601-603.
- [15] KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. 5th ed. Beijing: World Publishing Corporation, 2005.