

文章编号: 0258-702X(2002)02-0119-04

LD 端面抽运 1.5 W 单频稳频绿光激光器

王海波, 马 艳, 翟泽辉, 郜江瑞, 彭堃堃

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西太原 030006)

提要 光纤耦合激光二极管(LD)抽运 Nd:YVO₄激光晶体,采用 KTP 晶体腔内倍频,在输入抽运功率为 11 W 时,获得 1.5 W 稳定单频绿光输出,光-光转换效率 13.6%。通过边带锁频系统将基频激光频率锁定在 F-P 共焦参考腔的中心频率上,输出的倍频光频率稳定性优于 620 kHz,功率稳定性优于 ±1.5%。

关键词 LD 端面抽运, Nd:YVO₄晶体, 频率稳定性, 功率稳定性

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

1.5 W cw Frequency-stabilized and Intracavity Frequency-doubled Ring Laser End-pumped by Diode Laser

WANG Hai-bo, MA Yan, ZHAI Ze-hui, GAO Jiang-rui, PENG Kun-chi

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Inst. of Opto-electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006)

Abstract A cw frequency-stability and intracavity frequency-doubled ring Nd:YVO₄/KTP end-pumped by a laser diode through fiber-coupling is designed and experimentally demonstrated. Using the side-band frequency-locking technique, up to 1.5 W green output with the frequency-stability better than 620 kHz is achieved by the pump power of 11 W. The conversion efficiency from light to light is 13.6% and the fluctuation of output power is less than ±1.5%.

Key words LD end-pumped, Nd:YVO₄ crystal, frequency stability, power stability

1 引 言

激光二极管(LD)抽运的固体激光器光谱重叠度高、结构紧凑,受到人们的广泛关注。进入 20 世纪 80 年代以来,由于量子阱结构的提出及晶体生长工艺的发展,高效率、高功率激光二极管及其阵列取得了很大成就,推动 LD 抽运的固体激光器的发展达到了实用水平^[1]。采用 LD 抽运四镜及三镜折叠腔获得高达 5 W 内腔倍频绿光输出^[2,3]。单频稳频内腔倍频激光器是非线性光学及量子光学的重要光源,我们于 1993^[4]年到 1995^[5]年研究了灯抽运内腔倍频单频稳频激光器,采用 6 镜腔双 KTP 反向串接内腔倍频获得 1.5 W 单频稳频绿光,在倍频输出功率 650 mW 的情况下频率稳定性优于 5MHz。由于

灯抽运固体激光器本质上效率低、热效应严重,热与机械稳定性相对较差,功率与频率稳定性的进一步提高受到限制;此外,激光器及外围设备体积庞大、复杂,使其应用与发展受到限制。本文报道 LD 抽运的 4 镜环行腔单 KTP 内腔倍频激光器。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。抽运源为 Coherent 公司生产的 FAP™系统,通过直径为 800 μm,数值孔径为 0.20 的光纤耦合输出,输出波长可由温度调节,808 nm 最大输出功率为 16 W。耦合系统由准直透镜和聚焦透镜组成,耦合效率约为 85%。Nd:YVO₄晶体尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm,α 切割,通光长度为 5

收稿日期 2000-11-06;收到修改稿日期 2001-01-09

基金项目 国家自然科学基金(批准号 69778015,69978013)和山西省青年带头人基金资助项目。

作者简介 王海波(1974—)男,山西大学光电研究所在读博士生,主要从事激光技术与量子光学研究。E-mail:obian@

mm Nd 离子掺杂浓度为 0.5% ,两个通光面镀 1.064 μm 和 0.532 μm 双增透介质膜。采用 KTP 腔内倍频晶体尺寸为 5 mm \times 5 mm \times 5 mm ,以 II 类角度匹配方式切割 ,两个通光面镀 1.064 μm 和 0.532 μm 双增透介质膜 ,以降低腔内损耗。6 为输入耦合镜 ,对 1.064 μm 高反 ,808 nm 减反 , $R_{1.064 \mu\text{m}} > 99.5\%$,

$R_{808 \text{ nm}} < 5\%$;9,11 为凹面镜 ,对 1.064 μm 和 0.532 μm 双高反 , $R_{1.064 \mu\text{m}} > 99.5\%$, $R_{0.532 \mu\text{m}} > 99.5\%$,曲率半径为 50 mm 输出耦合镜对绿光增透 ,红外全反 , $R_{1.064 \mu\text{m}} > 99.5\%$, $R_{0.532 \mu\text{m}} < 5\%$ 激光器红外谐振绿光单次通过。

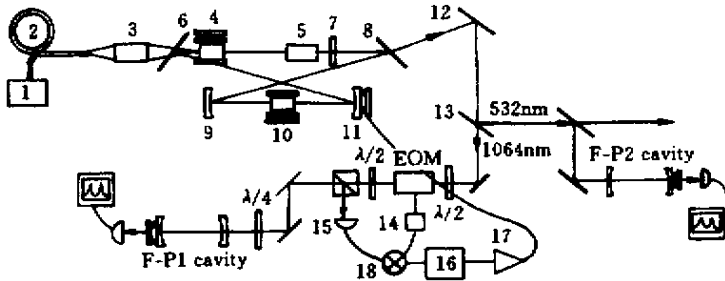


图 1 实验装置图

1 : 激光二极管 ;2 : 光纤 ;3 : 聚焦系统 ;4 : Nd:YVO₄ 晶体 ;5 : TGG 晶体 ;6 : 输入耦合镜 ;7 : $\lambda/2$ 波片 ;8 : 输出耦合镜 ;9 ,11 : 凹面镜 ;10 : KTP 晶体 ;12 : 双色镜 (HR @ 532 nm & 1064 nm) ;13 : 双色镜 (HR @ 532 nm , AR @ 1064 nm) ;14 : 高频信号源 ;15 : 快速响应探测器 (ETX-500) ;16 : PID 积分/微分电路 ;17 : 放大器 ;18 : 混频器 ;EOM : 电光调制器

Fig.1 Schematic of the experimental setup

1 : pumping laser ;2 : fiber ;3 : focusing optics ;4 : Nd:YVO₄ crystal ;5 : TGG ;6 : input coupler ;7 : $\lambda/2$ plate ;8 : output coupler ;9 ,11 : concave mirror ;10 : KTP crystal ;12 : dichroic mirror (HR @ 532 nm & 1064 nm) ;13 : dichroic mirror (HR @ 532 nm , AR @ 1064 nm) ;14 : signal generator ;15 : ETX-500 ;16 : PID system ;17 : amplifier ;18 : mixer ;EOM : electro-optic modulator

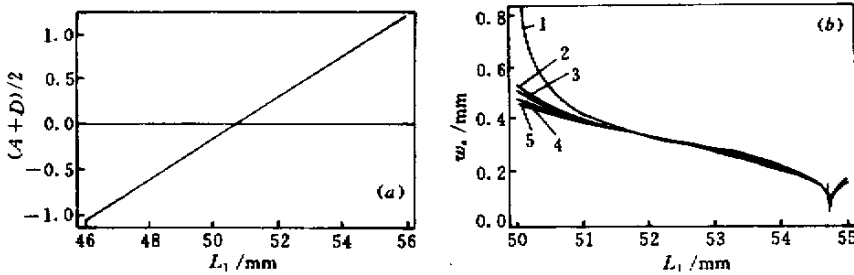


图 2 激光器参数随两凹面镜间距离 (L_1/mm) 的变化关系

(a) 稳定性参数随 L_1 的变化 (b) 倍频晶体中腰斑 w_0 随 L_1 及 Nd:YVO₄ 晶体热焦距 (F_t) 的变化

Fig.2 Function of laser parameters versus the distance between two concave mirrors (L_1/mm)

(a) for the stability parameter $(A + D)/2$;(b) for the spot sizes of waists w_0 at different thermal focal length (F_t)

1 : $F_t = \infty$; 2 : $F_t = 1000 \text{ mm}$; 3 : $F_t = 800 \text{ mm}$; 4 : $F_t = 600 \text{ mm}$; 5 : $F_t = 500 \text{ mm}$

激光腔采用“ ∞ ”字环形腔 ,消除空间烧孔效应 ,腔内插入由 $\lambda/2$ 波片和放在磁场中的 TGG 晶体 (使激光偏振方向转动 7°) 构成单向器 ,使激光器单向运转。激光器结构设计主要考虑抽运光的光束质量因子^[6] ,热不灵敏条件^[7,8]

$$\frac{dw}{df} = 0 \Rightarrow A + D = 0$$

用标准的 ABCD 矩阵法计算分析激光器运转特性 ,理论分析表明两个凹面镜间的距离 L_1 对整个激光

器运行的稳定性及腰斑影响较大 ,选取 $L_1 = 53 \text{ mm}$,激光器稳区图及不同热焦距情况下 KTP 晶体中腰斑变化如图 2 所示。谐振腔采用两个曲率半径为 50 mm 的平凹镜及两个平面镜组成 ,KTP 晶体内基频光腰斑半径约为 30 μm 。

3 实验结果与分析

输出激光经 532 nm 全反 ,1064 nm 增透双色片

分为两路,使用 LP-3B 型激光功率计测定 532 nm 倍频绿光的输出功率,基频光由另一路进入锁频反馈系统,对激光器频率锁定。用 F-P 1 腔监视基频激光输出模式, F-P 1 腔自由光谱范围 FSP = 750 MHz, 精细常数 $F = 100$; 用 F-P 2 腔监视绿光输出模式, 如图 3 所示。

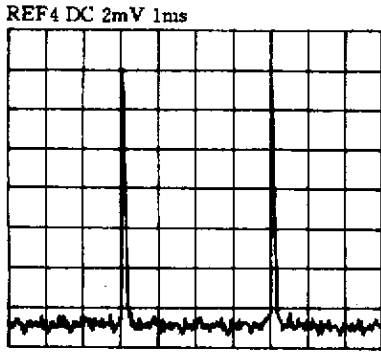


图 3 扫描共焦腔的透射曲线

Fig.3 Transmission from scanned confocal cavity

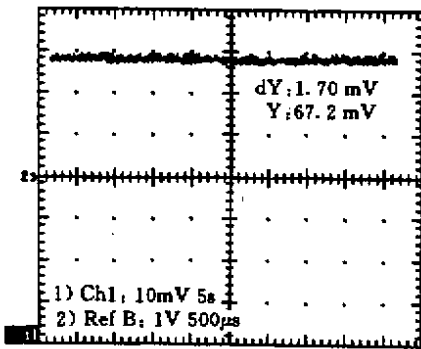


图 4 绿光输出功率波动 (< 3%)

Fig.4 Intensity fluctuation of green output (< 3%)

当激光二极管工作电流 $I = 20.00 \text{ A}$ 时(为最大驱动电流的 80%),激光二极管输出功率为 11 W 左右,耦合系统传输效率 85%,有效抽运功率为 9.4 W,此时测得最大单频绿光输出为 1.5 W,光-光转换效率为 15.9%。

使用 Coherent Modemaster 光束传输分析仪测量倍频绿光输出质量,输出绿光水平方向质量因子为 1.09, 竖直方向质量因子为 1.05, 接近衍射极限,水平方向质量因子相对较差,这是由于“ ∞ ”字环行腔凹面镜非轴向入射引入像散所致,因元件及腔长限制进一步减小折叠角实验上较难实现。水平-竖直腰斑对称度为 1.035,远场发散角对称度为 0.972。图 4 为实验测定的激光器绿光的功率稳定性,绿光功率波动为 2.5%。

实验对基频光频率锁定以稳定倍频输出。采用 F-P 1 腔作稳频基准, F-P 1 腔使用殷钢框架结构,腔体密封,减小气流及震动影响,以提高稳频精度。使用电光调制晶体对基频光加一频率为 27 MHz 的振幅调制信号,探测 F-P 1 腔反射信号,经混频检波得到误差信号(如图 5 所示)放大反馈至激光器压电陶瓷上,控制腔长,稳定激光器频率。激光器锁定以后的倍频绿光频率波动如图 6 所示(F-P 2 腔所测),对应的频率波动小于 620 kHz。

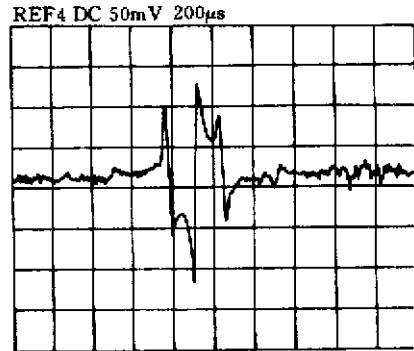


图 5 参考腔 1 扫描时所得的误差信号

Fig.5 Error signal from scanned reference cavity

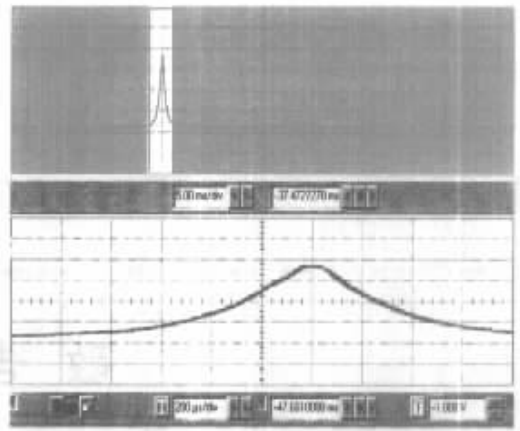


图 6 激光器锁定后参考腔 2 的透射曲线,透射峰的抖动对应频率的波动

Fig.6 Transmission from reference cavity with laser locked

在激光器腔型设计中考虑了激光晶体的热焦距及激光腔的热不灵敏条件,在抽运功率为 11 W 的条件下,通过理论计算设计腔型,选取参数。由于激光系统是对 11 W 抽运功率优化设计的,所以激光器在这一功率水平能很好地单频稳定工作,但在抽运功率改变较大时,激光输出模式变得不稳,功率有所下降,激光腔不能在抽运功率大范围变化情况下稳定运转。引起这个问题的主要原因有: 1) Nd:YVO₄ 晶

体的热传导系数较小,热焦距效应比较明显,使激光器偏离最稳区,造成激光输出不稳;2)激光器稳定运转时,Nd:YVO₄晶体的受激发射中心(或增益曲线中心)与腔内某一振荡纵模重合,这时纵模有最大的受激发射截面,与相邻的纵模有最大的增益差,抽运功率的改变造成Nd:YVO₄晶体局部折射率改变使该纵模偏离发射中心,与相邻腔纵模的增益差减小,增大了多模振荡的可能。

此外,Nd:YVO₄晶体及KTP晶体温度稳定性对激光器长期稳定运转影响较大,Nd:YVO₄晶体发射截面随晶体温度的升高而减小,可导致激光器输出功率下降;KTP是双折射晶体,采用二类角度匹配方式切割,温度的改变引起KTP对基波的退偏,导致腔内损耗加大,激光器功率下降。实验必须对Nd:YVO₄及KTP晶体精确控温,我们设计了一套控温系统,控温精度达到0.01°,满足了实验要求。

4 结 论

采用光纤耦合输出的激光二极管作为抽运源,Nd:YVO₄/KTP腔内倍频,在输入功率为11W的情况下,获得1.5W稳定单频绿光输出,光-光转换效率为13.6%。通过边带锁频系统将基频激光频率锁定在F-P共焦参考腔的中心频率上,输出的倍频光频率稳定性优于620kHz,功率稳定性优于±1.5%。

参 考 文 献

- 1 K. I. Martin, W. A. Clarkson, D. C. Hanna. 3 W of single-frequency output at 532 nm by intracavity frequency doubling of a diode-bar-pumped Nd:YAG ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12) 875 ~ 877
- 2 He Jing-liang, Hou Wei, Zhang Hengli *et al.*. Continuous-wave output of 5.5 W at 532 nm by intracavity frequency doubling of an Nd:YVO₄ laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**(6) 418 ~ 419
- 3 Liu Jun-hai, Wang Chang-qing, Lü Junhua *et al.*. Diode-laser-array single-end-pumped 5 W Nd:YVO₄/KTP continuous-wave solid-state green laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1999, **16**(7) : 508 ~ 509
- 4 Gao Jiang-rui, Wang Hai, Huang Maoquan *et al.*. CW ring frequency-stabilized and doubled Ce: Nd:YAG laser with 6 mirrors [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1993, **A20**(10) : 721 ~ 724
- 5 Gao Jiang-rui, Wang Hai, Huang Maoquan *et al.*. Intracavity frequency-doubled and stabilized cw ring Nd:YAG laser with a pair of KTP crystals [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(9) : 1519 ~ 1522
- 6 Paolo Laporta, Marcello Brussard. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(10) 2319 ~ 2326
- 7 Cui Fuyun, Wang Haibo, Ma Yan *et al.*. Frequency-stabilized Nd:YVO₄ ring laser with high power output ended pumped by diode laser [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(3) 271 ~ 273 (in Chinese)
- 8 Zhang Jing, Zhang Kuanshou, Wang Runlin *et al.*. All-solid-state Nd:YVO₄ ring laser with single-frequency operation [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(8) : 694 ~ 696 (in Chinese)



敬 告 作 者

根据“中国学术期刊(光盘版)”和“美国工程信息公司(EI)数据库”的要求,本刊从2002年第一期起对刊登的论文增加下列内容:

1. 论文第一作者简介(30~50字)。可按以下顺序列出:姓名(出生年月),性别,民族(汉族可省略),籍贯,职称,学位,研究方向。在简介前加“作者简介:”作为标识。
2. 电子信箱
3. 文章参考文献类型标识 [M]—专著(书) [C]—论文集 [J]—期刊文章 [D]—学位论文 [R]—报告 [S]—标准 [P]—专利,并置于论文题目后。[参考文献的题目、作者(3位以上写满3位)、年、卷、期、起始页码均须给全并准确]
4. 为便于联系和审稿,英文版稿件请附中文摘要。希作者在投稿时提供以上信息,谢谢合作。