

文章编号: 0258-7025(2008)03-0323-05

连续波 Nd:YVO₄/LBO 稳频倍频红光 全固态激光器

常冬霞 刘 侠 王 宇 葛 青 贾晓军 彭堃堃

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

摘要 利用激光二极管(LD)端面抽运 YVO₄-Nd:YVO₄ 复合晶体,采用四镜环形谐振腔及 I 类临界相位匹配(CPM)LBO 晶体进行腔内倍频,在腔中插入 TGG 晶体和 $\lambda/2$ 波片组成的光学单向器,设计了满足热不灵敏条件和最佳倍频条件的谐振腔型,实现了全固态连续稳频倍频红光激光器。在 19 W 抽运功率下,同时获得了 610 mW 的 671 nm 单频红光输出和 400 mW 的单频 1342 nm 红外光输出。红光 30 min 内输出功率波动小于 $\pm 0.6\%$ 。自由运转时,基频光(1342 nm)1 min 频率漂移为 ± 5 MHz,锁定后基频光 1 min 频率稳定性优于 ± 1 MHz。

关键词 激光器; YVO₄-Nd:YVO₄ 复合晶体; LBO 晶体; I 类临界相位匹配

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

All-Solid-State CW Intracavity Frequency-Doubled and Frequency-Stabilized Nd:YVO₄/LBO Red Laser

Chang Dongxia Liu Xia Wang Yu Ge Qing Jia Xiaojun Peng Kunchi

(State Key Laboratory for Quantum Optics and Quantum Devices,

Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract A continuous wave (CW) frequency-doubled and frequency-stabilized laser with red light output was designed and built. The laser resonator is in a ring configuration consisting of four mirrors, and a YVO₄-Nd:YVO₄ composite crystal end-pumped by a laser-diode serves as the laser material. A type-I critical phase-matched (CPM) LBO crystal and an optical diode constituted by a TGG and a $\lambda/2$ waveplate are placed inside the resonator to be used for the intracavity frequency-doubler and for forcing the laser to operate unidirectionally, respectively. The optical resonator is designed to satisfy the conditions of the thermal insensitivity and the optimum frequency-doubling. Under the pumped power of 19 W, the single-frequency second-harmonic-wave output of 610 mW at 671 nm wavelength and the fundamental laser output of 400 mW at 1342 nm are obtained, simultaneously. The intensity fluctuation of the output red laser is less than $\pm 0.6\%$ in 30 minutes. With and without the frequency-stabilizing servo system on, the laser frequency shifts at 1342 nm wavelength are better than ± 1 MHz and ± 5 MHz within 1 minute, respectively.

Key words lasers; YVO₄-Nd:YVO₄ composite crystal; LBO crystal; type-I critical phase-matched

1 引 言

1.3 μm 波段激光正好是硅光纤的一个传输窗口,在当今的光纤通信领域有着广泛的应用,而经过倍频得到的 0.65 μm 波段红光激光则在彩色显示、

激光医学及作为 Cr:LiSAF 激光器的抽运源等方面有着重要应用。当实现波长为 671 nm 的单频红光激光器后,利用该激光器作为抽运源有可能通过参量下转换得到光纤中低损耗传输的 1.34 μm 纠缠源。

收稿日期:2007-09-28; 收到修改稿日期:2007-10-17

基金项目:国家 973 计划(2006CB921101)、国家基金仪器专项(60527003)、国家自然科学基金(60608012,60736040,10674088)和教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0516)资助项目。

作者简介:常冬霞(1982—),女,山西人,硕士研究生,主要从事全固态激光器件方面的研究。E-mail:cdx0905@163.com

导师简介:彭堃堃(1936—),男,四川人,教授,主要从事量子光学和固体激光器件方面的研究。

E-mail:kcpeng@sxu.edu.cn

目前,对激光二极管(LD)抽运 Nd:YVO₄ 内腔倍频的红光激光器的研究大多都集中在多模及单横模输出^[1~6]。而对于线宽更窄、输出光束质量更高的连续单纵模红光激光器报道却不多^[7,8]。人们也尝试利用其他非线性方法产生单频红光输出,例如 J. M. Melkonian 等^[8]利用光学参量的差频过程获得了 100 mW 的单频红光。

本文介绍了对全固化红光激光器激光晶体及倍频晶体的选择和要求,激光器腔型对激光器稳定性的影响,以及得到的实验结果。

2 设计原理

2.1 激光晶体 YVO₄-Nd:YVO₄

Nd:YVO₄ 虽然存在热传导能力差、光损伤阈值低等缺点,但是也具有发射截面大、吸收带宽、斜效率高、输出光为线偏振等优点。我们选择 Nd:YVO₄ 晶体产生红光激光。但是与产生 1064 nm 的辐射相比,1342 nm 辐射的荧光谱线只有 1064 nm 辐射的 25%,使得在设计连续波高功率红光激光器时要特别重视激光晶体热效应的影响。而减少晶体掺杂浓度是降低晶体热效应的一个有效途径^[9,10]。所以,在设计腔型中比较了晶体在不同掺杂浓度时,671 nm 输出功率与抽运功率的变化关系,如图 1 所示。

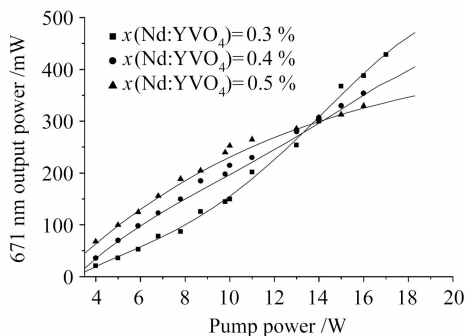


图 1 不同掺杂浓度时 671 nm 输出功率与抽运功率的关系

Fig. 1 Relation of the pump power versus 671 nm output power for different doped concentrations

从图 1 可以看出,虽然在低抽运功率下高掺杂浓度晶体输出红光功率较高,但是随着抽运光功率的增加,掺杂浓度低的晶体的输出特性明显好于掺杂浓度高的 Nd:YVO₄ 晶体。YVO₄-Nd:YVO₄ 复合晶体是把一块掺杂的激光晶体和一块纯的非掺杂同质基底材料通过键合技术稳固结合,在高功率抽运条件下,大量热可以通过非掺杂晶体(YVO₄)被

传走^[11~15],能有效地降低激光晶体的温度,减少由端面变形带来的热透镜效应的影响,得到比传统单一晶体更好的基模输出功率和更好的光束质量。

2.2 临界相位匹配 LBO 倍频

倍频晶体的匹配类型、匹配角度、有效非线性系数、走离角、接受角等都是需要考虑的重要因素,它们决定了倍频晶体的切割角度和长度,也影响到谐振腔的设计。图 2 比较了不同倍频晶体时 671 nm 输出功率与抽运功率的变化关系。

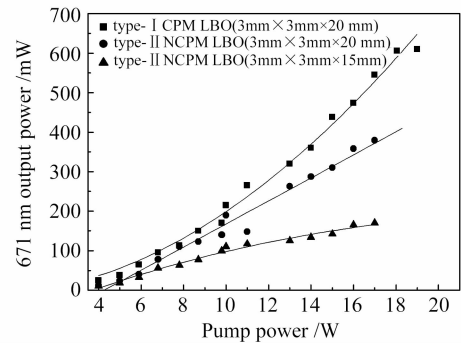


图 2 不同倍频晶体时 671 nm 输出功率与抽运功率的关系

Fig. 2 Relation of the pump power versus 671 nm output power for the different frequency-doubled crystals

从图 2 可以看出 I 类临界相位匹配(CPM) LBO 晶体的倍频转换效率明显比 II 类非临界相位匹配(NCPM) LBO 晶体高。分析原因是 I 类临界相位匹配 LBO 晶体走离角虽略大于 II 类非临界相位匹配 LBO 晶体(3.40 与 3.23),但具有有效非线性系数大(0.817 与 0.645)和不需要苛刻的温度条件等优点。而且双折射晶体 LBO 在 I 类相位匹配工作时不会改变基频光的偏振方向,从而使得谐振腔内基频光保持良好的偏振特性,可以保证激光器稳定运转。同时,由理论计算可知谐振腔的共焦长度为 24 mm,表明选择 20 mm 长的倍频晶体能够充分利用晶体长度提高倍频效率。

2.3 腔型设计

对于激光二极管端面抽运的固体激光器,为了得到单频运转,在四镜环形腔中插入光学单向器,消除内腔驻波效应及其空间烧孔效应,实现稳定的单纵模输出,从而实现单频输出^[16]。而且环形腔结构紧凑,损耗小,容易实现抽运光斑与激光腔模在增益介质中较好的匹配。

在谐振腔的设计中,为了使激光器能稳定高效运转,需满足谐振腔稳定性条件 $|A+D| \leq 2$,热不灵敏条件以及激光晶体中抽运光和振荡激光的模式

匹配条件。根据 ABCD 矩阵分析谐振腔的特性, 可以发现两凹面镜距离的变化对谐振腔内腰斑、共焦长度以及谐振腔的设计影响较大。因此, 我们数值计算了两个凹面镜间距离对激光器稳定性条件及谐振腔腰斑的影响。图 3 理论分析了两个凹面镜间距离对激光器稳定性条件的影响, 图 4 显示激光晶体处振荡光腰斑 w_0 随两个凹面镜之间距离的变化曲线。

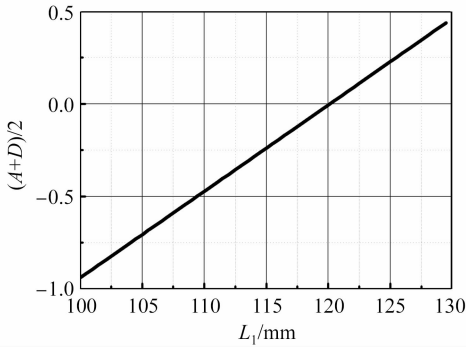


图 3 稳定性参数 $((A + D)/2)$ 随凹面镜间距离的变化
Fig. 3 Variation curve of the stability parameter $((A + D)/2)$ along with the distance between two concave mirrors

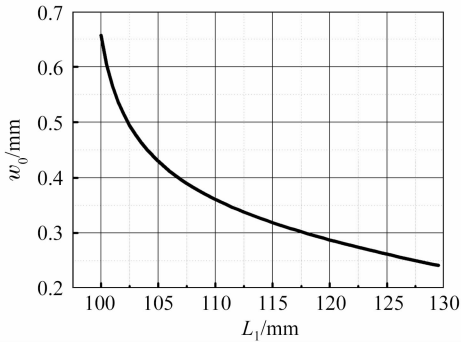


图 4 振荡光腰斑 w_0 随凹面镜间距离的变化
Fig. 4 Variation curve of the waist spot w_0 of the vibrating laser beam along with the distance between two concave mirrors

理论上, 当抽运光功率大于 3 W 时, 振荡激光与抽运光腰斑比在 0.8~1.0 之间能够达到很好的匹配效果^[9]。由图 3 和图 4 可以看出, 当凹面镜之间距离为 113 mm 时, 同时满足上述条件, 此时振荡激光的腰斑 w_0 为 330 μm 左右, 可以实现抽运光与激光腔模在增益介质中较好的匹配, 保证激光器稳定高效地运转。

3 实验装置及结果

实验采用光纤耦合的激光二极管作为抽运源,

输出的中心波长为 808 nm。经准直聚焦系统, 会聚成半径为 400 μm 的抽运光斑, 注入到复合晶体工作物质中。激光二极管抽运的单频红光激光器采用“ ∞ ”字形环形腔结构, 如图 5 所示。

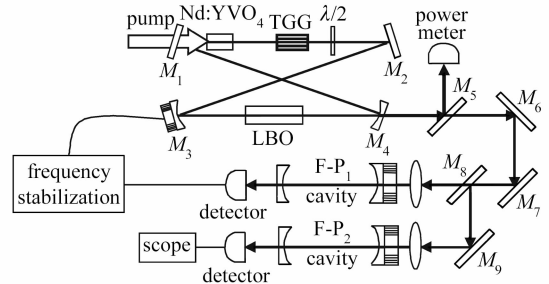


图 5 实验装置原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the experimental setup

YVO₄-Nd:YVO₄ 复合晶体采用 *a* 切割, 掺杂原子数分数为 0.3%, 尺寸为 3 mm × 3 mm × 13(6+7) mm (其中 6 mm 为 YVO₄ 基质, 7 mm 为 Nd:YVO₄ 晶体)。晶体的两端面除了镀 808 nm 和 1342 nm 减反膜外, 还需镀 1064 nm 减反膜用于防止其在激光晶体内起振。LBO 为倍频晶体, 尺寸为 3 mm × 3 mm × 20 mm, 以 I 类角度匹配方式切割 ($\theta = 86.1^\circ, \phi = 0^\circ$), 两端镀 1342 nm 和 671 nm 双色增透膜。晶体均用铝箔包裹置于一个紫铜热沉上, 通过制冷块进行温度控制。并且在激光器工作时, LBO 晶体置于腔镜 M₃ 和 M₄ 之间的束腰处。平面镜 M₁ 为输入耦合镜, 靠近抽运源的一端镀 808 nm 减反膜, 靠近激光晶体的一端镀 1342 nm 高反膜和 808 nm 增透膜; 腔镜 M₂ 为平面镜, 镀 1342 nm 高反膜; M₃ 和 M₄ 为凹面镜, 曲率半径为 100 mm, 其中 M₃ 凹面镀 1342 nm 和 671 nm 高反膜; M₄ 为输出耦合镜, 凹面镀 1342 nm 高反膜和 671 nm 增透膜, 平面镀 671 nm 减反膜。同时为了抑制 1064 nm 激光起振, 激光器四个腔镜对 1064 nm 总透射率大于 90%。同时腔内插入由 $\lambda/2$ 波片和放在磁场中的 TGG 晶体组成的单向器, 使激光器单向运转。

输出光经对 671 nm 高反, 对 1342 nm 增透的双色片 M₅ 分开, 红光入射到激光功率计内测定 671 nm 倍频红光的输出功率, 红外光再分成两路, 一路注入 F-P₁ 腔用于锁定激光器腔, 另一路用 F-P₂ 监视基频激光的输出模式。F-P₁ 和 F-P₂ 腔的自由光谱范围均为 1500 MHz。

在抽运功率为 19 W 时, 同时获得了 610 mW 的单频 671 nm 红光和 400 mW 的单频 1342 nm 红外激光输出。图 6 为用 F-P₂ 腔观察激光器的频率特性,

可以看出激光器处于单频运转。图 7 为自由运转输出功率在 470 mW 时测得的功率稳定性曲线, 30 min 内功率波动小于 $\pm 0.6\%$ 。图 8(a) 为用 F-P₁ 腔所得到的鉴频曲线, 峰值间频率宽度为 10 MHz。图 8(b) 为自由运转状态下记录到的 F-P₁ 腔的透射强度起伏。透射强度最大起伏相应于鉴频曲线峰值之间的

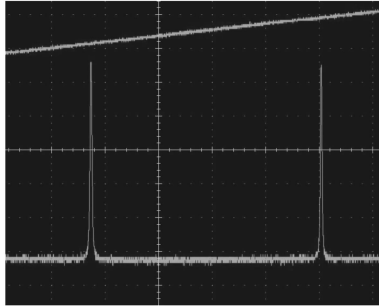


图 6 激光器的频率特性

Fig. 6 Frequency property of laser

频率宽度。由此可知, 1 mV 起伏对应于 2 MHz 频率稳定性, 激光器锁定后的频率漂移优于 ± 1 MHz; 图 8(c) 为激光器锁定后透射强度最大起伏所对应的频率宽度; 图 8(d) 为自由运转时 1 min 的频率漂移, 从波形的抖动可以看出基频光频率波动优于 ± 5 MHz; 图 8(e) 为锁定后 1 min 的频率漂移, 其频率波动优于 ± 1 MHz。两种测量方法得到的频率稳定性一致。

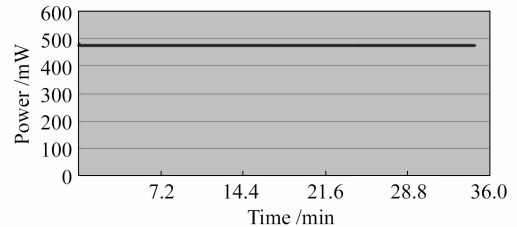


图 7 红光激光器的功率稳定性

Fig. 7 Power stability of the red laser

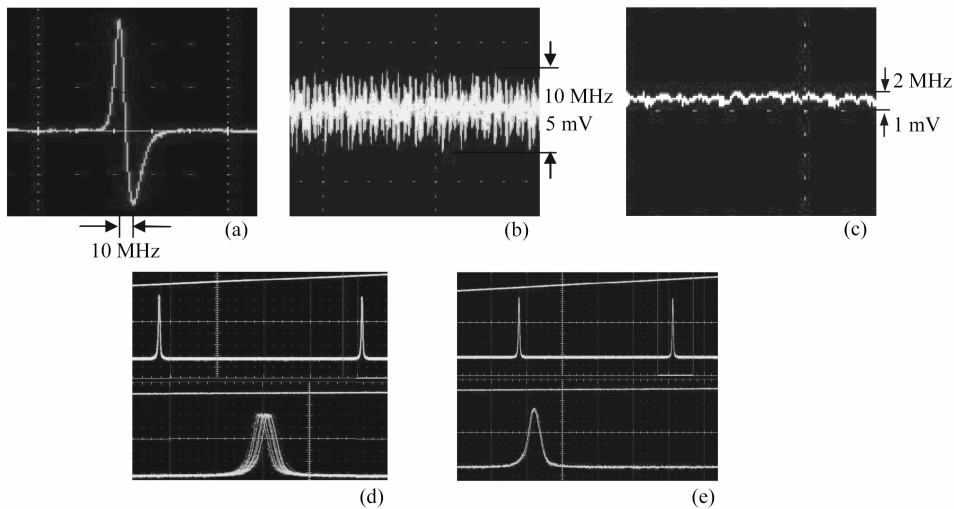


图 8 激光器的频率稳定性。(a) 鉴频曲线; (b) 自由运转时的频率稳定性; (c) 激光器锁定后的频率稳定性; (d) 自由运转时 1 min 的频率漂移; (e) 锁定后 1 min 的频率漂移

Fig. 8 Frequency stability of laser. (a) the curve of frequency discrimination; (b) the stability of frequency in the free operation; (c) the stability of frequency in the locking operation; (d) the frequency shift within 1 minute in the free operation; (e) the frequency shift within 1 minute in the locking operation

4 结 论

报道了光纤耦合激光二极管抽运全固态 YVO₄-Nd:YVO₄ 复合晶体/LBO 环形腔单频激光器, 采用 I 类临界相位匹配 LBO 作为倍频晶体, 在 19 W 的抽运功率下, 同时获得了 610 mW 的 671 nm 单频红光和 400 mW 的单频 1342 nm 红外激光输出。红光输出的功率波动小于 $\pm 0.6\%$, 频率锁定后, 基频光频率稳定性小于 ± 1 MHz。

参 考 文 献

- 1 A. Agnesi, G. C. Reali, P. G. Gobbi. 430 mW single-transverse-mode diode-pumped Nd:YVO₄ laser at 671 nm [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(7):1297~1300
- 2 Antonio Agnesi, Annalisa Guandalini, Giancarlo Reali. Efficient 671-nm pump source by intracavity doubling of a diode-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(5):1078~1082
- 3 Hamish Ogilvy, Michael J. Withford, Peter Dekker *et al.*. Efficient diode double-end-pumped Nd:YVO₄ laser operating at 1342 nm [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(19):2411~2415
- 4 Tan Huiming, Zheng Quan, Chen Yingxin *et al.*. Double-frequency 671 nm laser with type-I critical phase-matching

- LBO [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4):289~292
檀慧明, 郑 权, 陈颖新 等. LBO I 类临界相位匹配倍频 671 nm 激光器[J]. 中国激光, 2002, **A29**(4):289~292
- 5 Wang Changqing, Shen Deyuan, Lu Jianren *et al.*. 1.34 μm intracavity frequency-doubled Nd:YVO₄ laser pumped by a laser-diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(7):577~580
王长青, 沈德元, 卢建仁 等. 激光二极管泵浦的 1.34 μm 及其腔内倍频红光 Nd:YVO₄ 激光器[J]. 中国激光, 1997, **A24**(7):577~580
- 6 Zhou Rui, Ding Xin, Zhang Wen Wuqi *et al.*. High-power continuous-wave diode-end-pumped intracavity frequency doubled Nd:YVO₄ laser at 671 nm with a compact three-element cavity [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(4):849~851
- 7 Zheng Quan, Zhao Ling, Qian Longsheng. Study on a diode-pumped Nd:YVO₄/LBO single-mode red laser [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2003, **20**(5):547~549
郑 权, 赵 岭, 钱龙生. 二极管泵浦单纵模 Nd:YVO₄/LBO 红光激光器[J]. 量子电子学报, 2003, **20**(5):547~549
- 8 Jean-Michel Melkonian, Thu-Hien My, Fabien Bretenaker *et al.*. High spectral purity and tunable operation of a continuous singly resonant optical parametric oscillator emitting in the red [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(5):518~520
- 9 Y. F. Chen. Design criteria for concentration optimization in scaling diode end-pumped lasers to high powers; influence of thermal fracture [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(2):234~239
- 10 Y. F. Chen, L. J. Lee, T. M. Huang *et al.*. Study of high-power diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser at 1.34 μm ; influence of Auger upconversion [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **163**:198~202
- 11 Li Zhigang, Xiong Zhengjun, Huang Weiling *et al.*. Study of high power laser diode end-pumped composite crystal lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):297~300
李志刚, 熊政军, 黄维玲 等. 高功率激光二极管端面抽运复合晶体激光器的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(3):297~300
- 12 Li Xiaomin, Zhuo Zhuang, Li Tao *et al.*. Laser diode-pumped Nd:YVO₄/YVO₄ composite crystal laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):41~44
李晓敏, 卓 壮, 李 涛 等. 激光二极管抽运 Nd:YVO₄/YVO₄ 复合晶体激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(1):41~44
- 13 Tao Li, Zhuang Zhuo, Xiaomin Li *et al.*. Study on optical characteristics of Nd:YVO₄/YVO₄ composite crystal laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3):175~177
- 14 M. Tsunekane, N. Taguchi, T. Kasamatsu *et al.*. Analytical and experiment studies on the characteristics of composite solid-state laser rods in diode-end-pumped geometry [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**:9~18
- 15 M. Tsunekane, N. Taguchi, H. Inaba. High power operation of diode-end pumped Nd:YVO₄ laser using composite rod with undoped end [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(1):40~42
- 16 Qing Pan, Tiancai Zhang, Yun Zhang *et al.*. Intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized CW ring Nd:YAP laser [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(12):2394~2396