

文章编号: 0258-7025(2004)11-1281-04

8.1 W 全固态准连续红光 Nd:YAG 激光器

温午麒^{1,2,3}, 姚建铨^{1,2,3}, 丁 欣^{1,2,3}, 周建勇^{1,2,3}, 李 君^{1,2,3},
魏叔夫^{1,2,3}, 徐德刚^{1,2,3}, 周 睿^{1,2,3}, 张 强^{1,2,3}, 于意仲^{1,2,3}, 王 鹏^{1,2,3}

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)
(² 南开大学、天津大学联合研究院, 天津 300072; ³ 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 报道了利用 II 类临界相位匹配的 KTP 晶体(相位匹配角选为 $\theta = 59.9^\circ$, $\phi = 0^\circ$)对 Nd:YAG 在 $1.3 \mu\text{m}$ 附近的振荡进行腔内倍频, 产生高功率准连续红光激光的实验结果。激光器使用了一个连续运转的高功率激光二极管(LD)侧面抽运组件(组件内由 30 个 20 W 的二极管阵列呈三角形阵列分布抽运一根 Nd:YAG 圆棒), 使用声光调 Q 技术实现高重复频率输出, 并选用了平-凹直腔的腔体结构。对该激光器的基频($1.3 \mu\text{m}$ 波长)调 Q 和倍频红光的功率输出特性及光谱特性进行了研究。在 LD 抽运功率 453 W 时产生了最大输出功率 8.1 W 的准连续红光激光, 测量了此时的 M^2 值并给出了光强分布图。

关键词 激光技术; 全固态激光器; 红光激光; 倍频; KTP 晶体

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

LD Pumped Nd:YAG/KTP Quasi-Continuous Wave Red Light Laser with 8.1 W Output Power

WEN Wu-qi^{1,2,3}, YAO Jian-quan^{1,2,3}, DING Xin^{1,2,3}, ZHOU Jian-yong^{1,2,3},
LI Jun^{1,2,3}, WEI Quan-fu^{1,2,3}, XU De-gang^{1,2,3}, ZHOU Rui^{1,2,3},
ZHANG Qiang^{1,2,3}, YU Yi-zhong^{1,2,3}, WANG Peng^{1,2,3}

¹College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Institute of Laser and Optoelectronics,
Key Laboratory of Laser and Optoelectric Information Science and Technology,
Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

²Cooperated Institute of Nankai University and Tianjin University, Tianjin 300072, China

³State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract This paper reports the generation of high power quasi-continuous wave (Q-CW) red laser radiation by frequency-doubling a Nd:YAG ($\text{Nd}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) laser operating at wavelength near $1.3 \mu\text{m}$ with a KTP (KTiPO_4) crystal (type II phase match, $\theta = 59.9^\circ$, $\phi = 0^\circ$). The laser, with plane-concave cavity structure, is employing a high power CW pump module comprised a Nd:YAG rod side-pumped by thirty 20 W laser diode arrays (LDAs) of a triangle radial geometry, and an acousto-optic Q-switch which results in the laser high repeated Q-CW output. The laser output characteristics of fundamental and frequency-doubled wavelengths involving powers and spectra have been studied. The highest power of the quasi-CW red laser is 8.1 W, achieved at 453 W pump power of LD. The value of M^2 and the distribution figure of red beam at 8.1 W output power are given in the paper.

Key words laser technique; all-solid-state laser; red laser; frequency-doubling; KTP crystal

收稿日期: 2003-10-28; 收到修改稿日期: 2004-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(60278001 和 60278032)、国家 863 计划(2002AA311190)、天津市光电子联合科学研究中心、华中科技大学激光技术国家重点实验室([2001]0103)及教育部南开大学、天津大学科技合作基金资助项目。

作者简介: 温午麒(1970—), 男, 天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生, 主要从事全固态激光器及光学非线性频率变换研究。E-mail: lasertju@eyou.com

1 引 言

红光激光在激光显示、医疗如光动力学疗法(PDT)及作为可调谐激光器的抽运源等方面具有广阔的应用前景^[1]。尤其是在激光显示方面,提高红光激光的功率是目前大面积激光显示的关键。光纤耦合输出的激光二极管(LD)红光激光器及Nd:YVO₄倍频671 nm激光器近年来已得到迅速发展^[2,3]。但目前这两种激光器输出功率都较低,进一步提高功率水平均有一定困难;高功率红光激光二极管的工艺在国内还不是很成熟,要达到几瓦的功率还需将多个激光二极管的红光输出耦合进同一根光纤中,故整机的可靠性及使用寿命目前还不很理想;Nd:YVO₄激光器的红光功率受限于其一般采用的端面抽运耦合方式,端面抽运耦合方式要求抽运功率不能太高,太强的抽运会导致剧烈的热效应而使增益介质损坏,从而最终限制了该类激光器的红光输出水平。而利用Nd:YAG晶体在1.3 μm附近的跃迁进行二次谐波变换也可实现红光输出^[4]。由于Nd:YAG晶体可以采用侧抽运方式,抽运功率可以达到几百瓦甚至千瓦以上,从而有利于获得更高功率的红光输出。在1.3 μm附近Nd:YAG主要有两条相对较强的谱线,分别是R₂→X₁之间的跃迁,波长是1319 nm;R₂→X₃之间的跃迁,波长为1338 nm。这两条谱线具有基本相同的受激发射截面,但1319 nm的相对阈值比1338 nm要小些,故而1319 nm形成激光振荡的能力要略强一些。利用KTP晶体对这两种波长进行二次谐波变换均可得到红光激光。Inoue等^[5]在1999年报道了采用双棒串连,V型谐振腔结构,KTP内腔倍频获得了6.1 W的连续660 nm红光输出。本课题组也报道了使用连续氪灯抽运Nd:YAG,KTP倍频输出准连续红光,输出功率达到2 W^[6]。本文研究了1.3 μm波长的调Q输出特性;使用KTP晶体腔内倍频获得最高平均功率为8.1 W的红光激光。

2 实验装置

实验装置如图1,整套装置全为国产器件。采用中国科学院半导体所生产的808 nm半导体激光器组件,截面结构如图2所示。组件中使用30个bar条,最大抽运功率600 W,按照三角形等间距侧面抽运Nd:YAG棒。Nd:YAG的尺寸为φ5 mm×125 mm,侧面打毛,两端磨成平面,镀1064 nm和

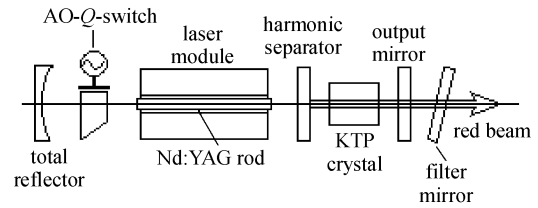


图1 实验装置示意图

Fig.1 Setup of experiment

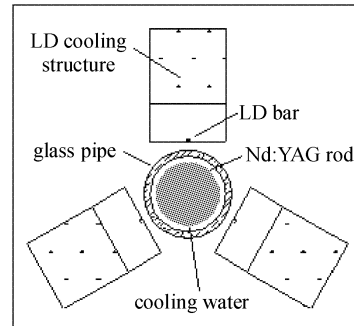


图2 抽运组件结构示意图

Fig.2 Structure of pumping module

1320 nm的双增透膜。Q开关选用声光Q开关,激光器输出频率定为10 kHz。倍频晶体采用II类相位匹配的KTP晶体,其尺寸为8 mm×8 mm×7.75 mm,两面抛光,未镀增透膜。KTP晶体采用水冷方式恒温在18℃。激光谐振腔采用平-凹腔结构,以便抑制激光晶体和KTP倍频晶体的热效应对激光腔体产生的负作用,激光腔长为34.2 cm。腔内各镜片的参数为:凹面全反镜曲率半径 $r=1.1$ m,镀1064 nm高透(透射率 $T>89\%$),1320 nm高反(反射率 $R>98\%$)膜;红光输出镜为1064 nm高透($T>89\%$),1320 nm高反($R>98\%$),660 nm高透($T=94.4\%$);谐波反射镜镀1064 nm和1320 nm高透(对1064 nm, $T>90\%$,对1320 nm, $T>92\%$)和660 nm高反膜($R>94\%$)。这样镀膜的效果是使激光器在1.3 μm产生激光振荡时,抑制1064 nm的振荡。在激光输出镜后面放置另一块红光输出镜作为滤光镜,以便滤除激光器的基频光。另外在做基频(1.3 μm波长)调Q实验时,撤掉KTP晶体和谐波反射镜,输出镜换用1.3 μm波长的输出镜。实验中使用Molelectron公司的宽带响应功率计测量了基频(1.3 μm)和红光激光输出功率,并使用Agilent公司86142B光纤光谱仪及Spiricon公司的M²-200光束质量分析仪测量了红光输出的光谱及光束质量。

3 实验结果与分析

首先进行了激光器基频输出实验。腔内无 KTP 晶体及谐波镜,输出镜选用 1320 nm 波长透过率 $T=8.3\%$ 的输出镜,腔长 32 cm,激光器输出频率仍为 10 kHz。激光器调 Q 输出功率曲线如图 3 所示,激光器阈值 210 W,最大纯调 Q 输出功率约 32 W,继续增加抽运功率由于声光 Q 开关不能实现关断,激光器输出有直流成分。激光器连续运转时输出光谱为纯 1319 nm,但在调 Q 运转时观察到 1319 nm 和 1338 nm 两条激光谱线。这是由于这两条谱线的激光振荡能力相差很弱,调 Q 运转时激光器处于瞬变态,激光器容易形成多波长运转。

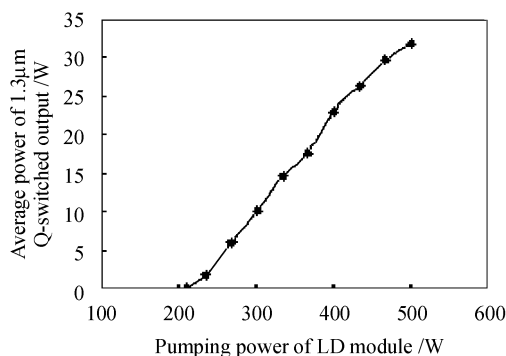


图 3 激光器的基频调 Q 输出随抽运功率的变化曲线

Fig. 3 Power of 1.3 μm Q-switched output as a function of pumping power

为在多波长的不良条件下获得高功率的红光输出,采用优化 KTP 切割角的方法。先按 T. Y. Fan^[7]的 KTP 色散方程计算出 1319 nm 的倍频匹配角为 $\theta=60.7^\circ$ 和 $\phi=0^\circ$ 。将 KTP 晶体按此角切割,作腔外实验。偏转 KTP 晶体,测量红光转换效率最高时的 KTP 偏转角度,从而确定了 $\theta=59.9^\circ$ 和 $\phi=0^\circ$ 的优化切割角。将 KTP 晶体重新切割、抛光。

再次实验所测得的红光的光谱如图 4 所示。从图中可看出,红光光谱中最强的是 659.5 nm,为 1319 nm 的倍频;其次是 664 nm,为 1319 nm 与 1338 nm 的和频;1338 nm 的倍频谱线 669 nm 很弱。光谱测量表明,通过实验所选择的 KTP 切割角主要针对 1319 nm 的倍频及 1319 nm 与 1338 nm 的和频,KTP 切割角与 1338 nm 倍频的最佳匹配角相差较大,故而红光光谱主要由 660 nm 与 664 nm 组成。测量出的红光激光输出功率随 LD 电流的变

化关系曲线如图 5 所示。激光器阈值约 120 W。在 LD 功率为 453 W 时,输出功率达到最高值,此时红光功率 8.1 W。LD 电流继续增加,由于增益介质的热效应导致输出功率开始下降。在激光器输出最大功率时使用 Spiricon 公司的 M^2 -200 型光束质量分析仪对光束特性进行研究,测得的光斑强度分布如图 6 所示; M^2 数值的测量表明,在水平方向 M^2 约为 47,在垂直方向 M^2 约为 32。

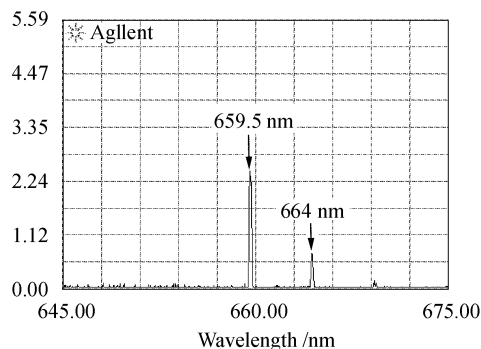


图 4 红光激光光谱

Fig. 4 Spectrum of red beam

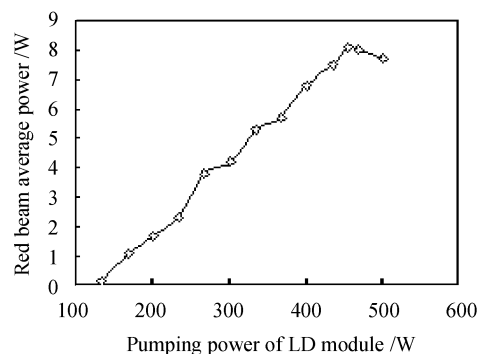


图 5 红光输出功率随 LD 抽运功率的变化曲线
Fig. 5 Output power of red beam as a function of pumping power

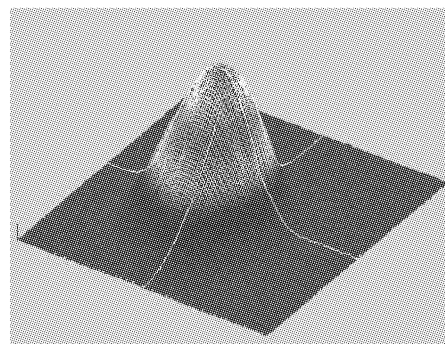


图 6 红光输出功率 8.1 W 时的光斑强度分布
Fig. 6 Intensity distribution of red beam at 8.1 W output power

由于存在两种基波波长(1319 nm 和 1338 nm),而这两种波长在腔内竞争,导致激光器输出功率存在一定的起伏。长时间观测表明,输出功率不稳定性约 10%。在 Inoue 等^[5]的实验中同样遇到这一情况,在腔内插入标准具后通过抑制 1338 nm 的振荡不仅改善了输出稳定性,还提高了输出功率。

4 结 论

利用侧抽运 Nd:YAG 组件抽运功率高及 KTP 倍频晶体非线性系数大的优点,通过实验优化出合适的 KTP 对 1319 nm 的相位匹配角,最终实现了高功率准连续的 Nd:YAG/KTP 红光输出,最大红光输出功率达到了 8.1 W。对红光输出的一些特性进行了测量和分析。

参 考 文 献

- 1 Chen Changshui, Li Yunkui, Yin Shaotang *et al.*. 660 nm pumped LiTaO₃:Cr³⁺ laser operation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(1):13~14
陈长水,李运奎,殷少唐等. 660 nm 激光抽运 LiTaO₃:Cr³⁺ 晶体的激光运转[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(1):13~14
- 2 Tan Huiming, Zhang 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
- 3 Zhang Hengli, Zhu Naiyi, Yang Qiansuo *et al.*. Study of an efficient Nd:YVO₄ red laser pumped by laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3):274~277
张恒利,竺乃宜,杨乾锁等. 激光二极管抽运 Nd:YVO₄/LBO 红光激光器研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(3):274~277
- 4 Wang Tao, Yao Jianquan, Li Xifu *et al.*. Study on CW Nd:YAG laser at 1319 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10):881~884
王 涛,姚建铨,李喜福等. 波长为 1319 nm 的连续输出 Nd:YAG 激光器的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10):881~884
- 5 Yoko Inoue, Susumu Konno, Tetsuo Kojima *et al.*. High-power red beam generation by frequency-doubling of a Nd:YAG laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(11):1737~1740
- 6 Wang Tao, Yao Jianquan, Li Xifu *et al.*. A CW Nd:YAG intracavity frequency-doubled red laser [J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(3):10~12
王 涛,姚建铨,李喜福等. 准连续 660 nm Nd:YAG 内腔倍频激光器的研究[J]. *激光杂志*, 2002, **23**(3):10~12
- 7 Yao Jianquan. *Nonlinear Optical Frequency Conversion and Laser Tuning Technology* [M]. Beijing: Science Press, 1995
姚建铨著. *非线性光学频率变换和激光调谐技术*[M]. 北京:科学出版社,1995

本 刊 增 页 启 事

为了缩短论文发表周期,经上级批准,从 2005 年第 1 期起,本刊将从 128 页增至 144 页。欢迎专家学者踊跃投稿。

中国激光编辑部

2004 年 11 月