

doi:10.3788/gzxb20144304.0414002

基于 Nd : YAG/Cr : YAG/YAG 键合晶体 LD 侧面泵浦激光器

江炜^{1,2}, 何青^{1,2,3}, 陈振强^{1,2}, 朱思祁^{1,2}, 陈在俊^{1,2},
王苏娥^{1,2}, 陈雨娇^{1,2}, 尹浩^{1,2}

(1 暨南大学 光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广州 510632)

(2 暨南大学 理工学院 光电工程系, 广州 510632)

(3 广东医学院 生物医学工程系, 广东 东莞 523000)

摘 要:利用 Nd : YAG/Cr : YAG/YAG 键合晶体, 建立了具有高平均输出功率的 LD 侧面泵浦被动调 Q 激光器系统. 当 Cr : YAG 的初始透过率为 85%、最大泵浦光功率为 187.5 W 时, 1 064 nm 激光的平均输出功率为 83.68 W. 通过 KTP 晶体进行倍频, 在最大泵浦光功率下, 产生了 27.2 W 532 nm 绿光激光脉冲, 同时脉冲宽度和重复频率分别为 210 ns 和 21.2 kHz; 绿光单脉冲能量和峰值功率分别为 1.28 mJ 和 6.1 kW; 泵浦光(808 nm)到倍频光(532 nm)的光-光效率为 14.5%.

关键词:激光器; 键合晶体; LD 侧面泵浦; 被动调 Q; 谐振腔; 倍频

中图分类号: TN248.1; TN242

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0414002-4

LD Side-pumped Laser Based on Nd : YAG/Cr : YAG/YAG Composite Crystal

JIANG Wei^{1,2}, HE Qing^{1,2,3}, CHEN Zhen-qiang^{1,2}, ZHU Si-qi^{1,2},
CHEN Zai-jun^{1,2}, WANG Su-e^{1,2}, CHEN Yu-jiao^{1,2}, YIN Hao^{1,2}

(1 Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies, Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

(2 Institute of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

(3 Biomedical Engineering Department, Guangdong Medical College, Dongguan, Guangdong 523000, China)

Abstract: A high average power passively Q-switched LD side-pumped laser system at 1 064 nm was set up by using Nd : YAG/Cr : YAG/YAG composite crystal. With 85% initial transmission of Cr : YAG, the average output power of 1 064 nm was measured. Under the maximum pump power of 187.5 W, the maximum average output power of 83.68 W at 1 064 nm was obtained. By frequency doubling the 1 064 nm laser output in a KTP nonlinear crystal, 27.2 W green laser pulses at 532 nm with the corresponding pulse width of 210 ns and the repetition rate of 21.2 kHz were produced under the maximum pump power. The green laser single-pulse energy was 1.28 mJ and the peak power was 6.1 kW. And the optical-to-optical conversion efficiency of pump light to frequency-doubling light was 14.5%.

Key words: Lasers; Composite crystal; LD side-pump; Passively Q-switch; Cavity; Frequency double

OCIS Codes: 140.3480; 140.3540; 140.3515; 140.3530

基金项目: 广东省省部产学研项目(No. 2010B090500022)、广州市科技攻关项目(No. 11A32070514)和广东省自然科学基金项目(No. S2013040016819)资助

第一作者: 江炜(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为全固态激光技术. Email: sjiangwei@hotmail.com

导师(通讯作者): 陈振强(1965-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为晶体材料与激光器件. Email: tzqchen@jnu.edu.cn

收稿日期: 2013-08-19; 录用日期: 2013-11-19

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

近几年,平均输出功率高、性能稳定、结构紧凑的激光系统已经得到了广泛应用^[1-2].在全固态 LD 泵浦激光器中,增益介质与可饱和吸收体键合的复合晶体在激光器系统中的应用十分广泛.相对于传统晶体,键合晶体能够有效地减小谐振腔长度,提高谐振腔效率^[3].

文献[4-6]报道了采用 Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体的薄片激光器.报道中的薄片激光器可以获得窄脉冲但是不能获得相对高的平均输出功率.同样,Cr:YAG 与 Nd:YAG 键合的晶体已应用于 LD 端面泵浦 532 nm 绿色激光器^[7-9]和喇曼激光器^[10],但报道中的激光器均受热透镜效应的限制.为了提高晶体的导热性能,可以将一片未掺杂的晶体键合在增益介质的一端,例如 YVO₄/Nd:YVO₄ 晶体和 YAG/Nd:YAG/YAG 晶体^[11-13].因此,将同种基质材料的增益介质、可饱和吸收体和未掺杂晶体键合在一起既可以使被动调 Q 激光器的谐振腔更加紧凑,同时在侧泵系统中也能够有效地改善激光器的热效应.

本文采用 LD 侧面泵浦 Nd:YAG/Cr:YAG/YAG 键合晶体的直腔结构,在 Cr:YAG 初始透过率(T_0)为 85%、最大泵浦光功率为 187.5 W 时,能够获得平均输出功率为 85.6 W 的 1 064 nm 基频光输出.通过 II 类相位匹配 KTP 晶体的倍频作用,在最大泵浦光功率下,测量得到平均输出功率 27.2 W 的 532 nm 倍频光的脉冲宽度和重复频率分别为 210 ns 和 21.2 kHz.

1 实验装置

图 1 为 Nd:YAG/Cr:YAG/YAG 键合晶体的结构.Nd:YAG 晶体作为增益介质,Cr:YAG 晶体作为被动调 Q 开关,YAG 晶体键合在 Cr:YAG 一端用来改善激光棒的热效应.因此 Nd:YAG/Cr:YAG/YAG 键合晶体棒可以同时置于 LD 侧泵模块中进行水冷却,而不需要对可饱和吸收体进行独立的温度控制,在节约成本的同时也使腔型紧凑.

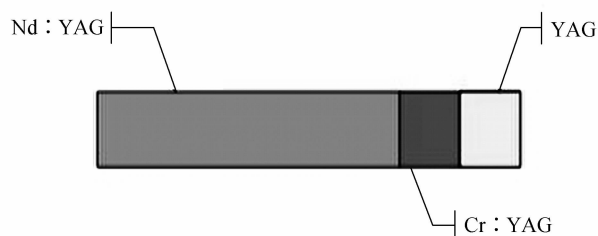


图 1 键合晶体结构

Fig. 1 The structure of the composite crystal rod

激光器实验结构如图 2,为了使腔型更加紧凑,谐

振腔采用直腔结构.谐振腔长度为 118 mm, M_1 到 M_2 , M_2 到 M_3 的距离分别为 78 mm 和 40 mm. LD 侧面泵浦模块(吉泰基业)的泵浦波长为 808 nm,最大电功率是 625 W,其电光转换效率是 30%,即最大泵浦光功率为 187.5 W(此时 1 064 nm 连续输出的平均输出功率最大为 100 W).Nd:YAG/Cr:YAG/YAG 键合晶体(福建聚光)的总长度和直径分别为 65 mm 和 3 mm.其中,Nd:YAG 晶体的掺杂浓度为 1.0 at.%,长度为 61 mm;Cr:YAG 晶体($T_0=85\%$)和 YAG 晶体的长度都是 2 mm.键合晶体棒的两端套上 O 圈后刚好能够全部放入侧泵模块的腔体中. II 类相位匹配的 KTP 晶体($5\times 5\times 8\text{ mm}^3$)用来进行倍频,将其置于铜块中,通过温控系统将其温度控制在 25℃.为了获得更好的输出结果,键合晶体的两个端面镀膜 AR@1 064 nm ($R<0.2\%$),KTP 晶体的两个端面镀膜 AR@1 064 nm & 532 nm ($R<0.2\%$).系统中 M_1 、 M_2 和 M_3 均是平面镜, M_1 镀膜 HR@1 064 nm & 532 nm ($R>99.6\%$),532 nm 激光输出耦合镜 M_3 镀膜 HR@1 064 nm ($T<0.3\%$) & HT@532 nm ($T=96.3\%$),中间镜 M_2 用于阻止倍频光进入侧泵系统减小损耗, M_2 镀膜 HT@1 064 nm ($T=94.7\%$) & HR@532 nm ($R>99.6\%$).

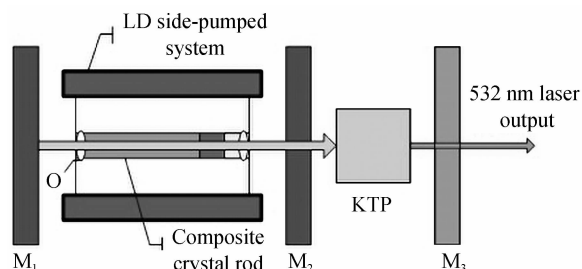


图 2 激光器实验结构

Fig. 2 The experimental structure of laser

2 实验结果

被动调 Q 1064 nm 激光器谐振腔由图 2 中平面镜 M_1 、侧泵系统、键合晶体以及 1 064 nm 输出耦合镜(透过率 $T=10\%$)组成.

图 3 为 1 064 nm 基频光平均输出功率与泵浦光功率的关系曲线,输出斜率效率为 62.8%,当最大泵浦光功率为 187.5 W 时,获得最大平均输出功率为 83.68 W.532 nm 倍频激光平均输出功率与泵浦光功率的关系曲线见图 4,当最大泵浦光功率为 187.5 W 时,获得平均输出功率为 27.2 W 的绿光输出,其泵浦光阈值功率为 49.68 W,泵浦光到倍频光的光-光转换效率为 14.5%.实验中,随着泵浦功率的增加,Nd:YAG 和 Cr:YAG 中形成了热能的沉积,而末端键合的未掺杂 YAG 晶体对于泵浦光的吸收相对微弱,能够充当热沉的作用,将晶体产生的热量不仅由激光棒

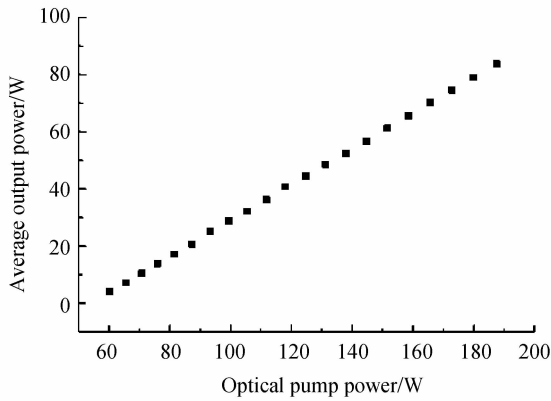


图3 1 064 nm 平均输出功率与泵浦光功率的关系
Fig. 3 Optical pump power-the average output power of 1 064 nm curve

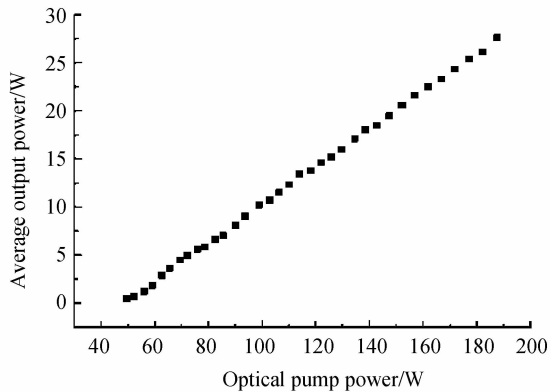


图4 532 nm 平均输出功率与泵浦光功率的关系
Fig. 4 Optical pump power-the average output power of 532 nm curve

的径向扩散,还能由棒的轴向扩散,降低晶体棒内的温升.

在激光系统中,倍频光的光强度正比于基频光光强度的平方,换言之基频光的峰值功率越强能获得的倍频效率越高^[14],即

$$\frac{|I_{2\omega}|}{|I_{\omega}|} = \frac{8\pi^2 L^2 d_{\text{eff}}^2}{n_{\omega}^2 n_{2\omega} \lambda_{\omega}^2 c \epsilon_0} |I_{\omega}| \left[\frac{\sin\left(\frac{\Delta KL}{2}\right)}{\frac{\Delta KL}{2}} \right]^2$$

式中, L 是非线性晶体长度, d_{eff} 是非线性晶体的有效非线性系数, n_{ω} 是基频光的折射率, $n_{2\omega}$ 是二次谐波折射率, c 是真空的光速, ϵ_0 是介电常量.

当 Cr:YAG 的初始透过率越小时,基频光的脉宽变窄,峰值功率变大,倍频效率提高.但是初始透过率小的 Cr:YAG 会增大腔内损耗,倍频效率变低.因此改变 Cr:YAG 的初始透过率能够使得倍频效率达到最优.实验中对比了 Cr:YAG 初始透过率 $T_0=65\%$ 、 80% 、 85% 和 95% 键合晶体的平均输出功率与泵浦光功率之间的关系,发现当 Cr:YAG 初始透过率为 $T_0=85\%$ 时获得倍频光的平均输出功率最大.

图 5 为 532 nm 绿光激光的重复频率和脉冲宽度随着泵浦光功率的变化,发现脉冲宽度随着泵浦光的

变化没有明显的变化,而重复频率随着泵浦光的变化近似地呈对数变化.如图 5 所示,绿光的脉冲宽度约为 210 ns,在使用 Cr:YAG 作为可饱和吸收体的被动调 Q 激光器中,侧泵系统相对于端泵系统^[7,15]不能产生窄的脉冲主要有两个原因:一是相对于端泵系统,侧泵模块增加了谐振腔的长度,从而增加了往返渡越时间;二是端泵系统中,泵浦光可以聚焦到激光介质中,其泵浦光功率密度远大于侧泵系统,引起了更强的受激辐射从而缩短了脉宽.

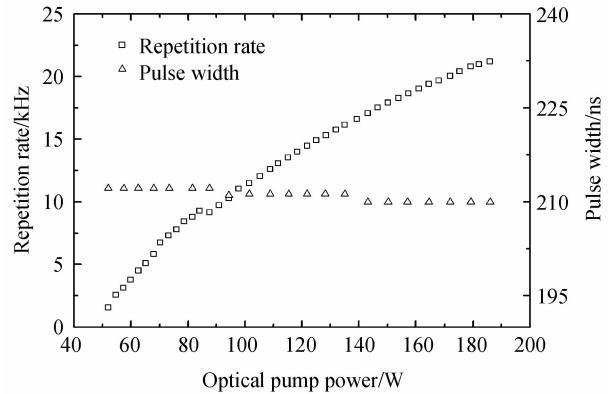


图5 532 nm 激光重复频率和脉冲宽度随泵浦光的变化曲线
Fig. 5 The repetition rate and pulse width at 532 nm with the change of optical pump power

在最大泵浦功率下,实验测量得到被动调 Q 532 nm 激光的 M^2 为 $M_x^2=1.35$, $M_y^2=1.98$. 光束质量分析仪采集到的远场光斑图如图 6.

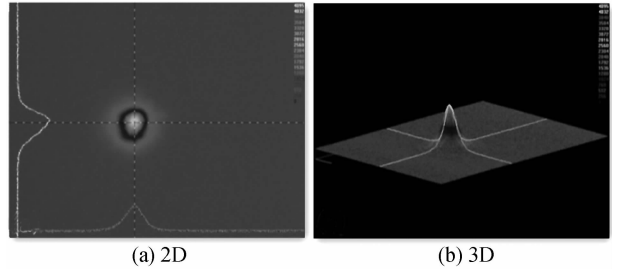


图6 532 nm 激光输出 2D 和 3D 光束质量图

Fig. 6 Beam quality image of green output laser at 532 nm respectively

3 结论

采用 Nd:YAG/Cr:YAG/YAG 键合晶体和侧泵模块实现了 1 064 nm 和 532 nm 激光输出,有效改善了激光器的热效应,增加了主动调 Q 器件腔型的紧凑性并节约了成本.在最大泵浦光功率为 187.5 W 时,获得平均输出功率为 83.68 W 的 1 064 nm 基频光输出,倍频后获得平均输出功率为 27.2 W 的 532 nm 倍频光输出,倍频光的重复频率和脉冲宽度分别为 21.2 kHz 和 210 ns,脉冲能量和峰值功率分别为 1.28 mJ 和 6.1 kW.

参考文献

- [1] ZHANG Yu-ping, ZHENG Yi, ZHANG Hui-yun, *et al.* High stability LD-pumped CW laser at 532 nm by intracavity-doubled Nd : YVO₄ laser using KTP [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 970-973.
张玉萍, 郑义, 张会云, 等. 高稳定 LD 泵浦腔内倍频 Nd : YVO₄/KTP 连续绿光激光器 [J]. 光子学报, 2006, **35**(7): 970-973.
- [2] ZHOU Cheng. LD pumped laser with high conversion efficiency Nd³⁺ : GdVO₄ solid-state by extra cavity double frequency [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1774-1776.
周成. LD 泵浦腔外倍频高转换效率 Nd³⁺ : GdVO₄ 固体激光器 [J]. 光子学报, 2007, **36**(10): 1774-1776.
- [3] LI Xiao-min, ZHUO Zhuang, LI Tao, *et al.* Diode-pumped Nd : YVO₄/YVO₄ composite crystal green laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8): 1381-1383.
李晓敏, 卓壮, 李涛, 等. 激光二极管泵浦 Nd : YVO₄/YVO₄ 复合晶体绿光激光器 [J]. 光子学报, 2007, **36**(8): 1381-1383.
- [4] ZAYHOWSKI J J, WILSON A L. Pump-induced bleaching of the saturable absorber in short-pulse Nd : YAG/Cr⁴⁺ : YAG passively Q-switched microchip lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, **39**(12): 1588-1593.
- [5] FELDMAN R, SHIMONY Y, BURSHTAIN Z. Passive Q-switching in Nd : YAG/Cr⁴⁺ : YAG monolithic microchip laser [J]. *Optical Materials*, 2003, **24**(1-2): 393-399.
- [6] WANG H X, YANG X Q, ZHAO S, *et al.* 2 ns-pulse, compact and reliable microchip lasers by Nd : YAG/Cr⁴⁺ : YAG composite crystal [J]. *Laser Physics*, 2009, **19**(8): 1824-1827.
- [7] ZHU S Q, WANG S E, CHEN Z Q, *et al.* High-power passively Q-switched 532 nm green laser by using Nd : YAG/Cr⁴⁺ : YAG composite crystal [J]. *Laser Physics*, 2012, **22**(6): 1-4.
- [8] YANG X Q, WANG H X, HE J L, *et al.* A compact passively Q-switched intra-cavity frequency doubled Nd : YAG/Cr⁴⁺ : YAG composite crystal green laser [J]. *Laser Physics*, 2009, **19**(10): 1964-1968.
- [9] MIAO Jie-guang, WANG Bao-shan, PENG Ji-ying, *et al.* Efficient diode-pumped passively Q-switched laser with Nd : YAG/Cr : YAG composite crystal [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, **40**(1): 137-141.
- [10] YANG H W, ZHAO J X, HUANG H T, *et al.* The first-Stokes pulse generation in Nd : KGW intracavity driven by a diode-pumped passively Q-switched Nd : YAG/Cr⁴⁺ : YAG laser [J]. *Laser Physics*, 2011, **21**(2): 343-347.
- [11] ZHUO Zhuang, LI Tao, LI Xiao-min, *et al.* Investigation of Nd : YVO₄/YVO₄ composite crystal and its laser performance pumped by a fiber coupled diode laser [J]. *Optics Communications*, 2007, **274**(1): 176-181.
- [12] XIA K G, UEDA K I, LI J L. Radially polarized, actively Q-switched, and end-pumped Nd : YAG laser [J]. *Applied Physics B*, 2012, **107**(1): 47-51.
- [13] CHEN Wei-dong, WEI Yong, HUANG Cheng-hui, *et al.* Second-Stokes YVO₄/Nd : YVO₄/YVO₄ self-frequency Raman laser [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(11): 1968-1970.
- [14] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. 5th ed. New York: Springer, 2005, Chap. 10.
- [15] LIU Jie, YANG Ji-min, HE Jing-liang. Diode-pumped passively Q-switched c-cut Nd:GdVO₄ laser [J]. *Optics Communications*, 2003, **219**(1-6): 317-321.