

利用复合 Nd:YAG 实现 600 mW 高效紧凑型 蓝光激光器*

高兰兰 檀慧明

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130022)

摘要 报道了采用复合 Nd:YAG 晶体, LBO 腔内倍频, 简单的平凹谐振腔结构实现大功率 LDA 泵浦条件下高效率蓝光激光器. 利用大功率泵浦情况下晶体的热透镜效应实现最优模式匹配, 在可吸收泵浦功率为 15.09 W 时, 激光器的 473 nm 蓝光功率输出达 600 mW, 光-光转化效率达 3.98%.

关键词 复合 Nd:YAG; 紧凑型; 蓝光激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

0 引言

LD 泵浦的全固体激光器具有结构紧凑、光-光转换效率高、稳定性好等优点, 在光通讯、激光医学、激光打印、显示和光量子学等方面具有重要应用. 通过倍频产生 532 nm 波长的全固体绿激光器技术已发展成熟, 大、中、小型激光器已走向市场. 而 473 nm 波长的全固体蓝激光器由于其基频光 946 nm 波长激光属于准三能级系统跃迁, 下能级粒子数占基态总粒子数的 0.74%, 存在严重的再吸收损耗^[1-3], 要想实现该谱线振荡, 必须有很高的泵浦功率密度. 同时由于 946 nm 激光谱线的受激发射截面约为 $4.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^{-2}$, 只有 1064 nm 激光谱线的 1/10, 存在强烈的谱线竞争. 因此, 在常温下要实现高效 946 nm 或其倍频光 473 nm 激光输出非常困难. 通常情况下科研工作者多采用一个或多个 LDA (laser diode array) 一端或多端泵浦, 采用 V⁴ 型或 Z⁵ 型折叠腔在水冷系统的控制下实现 946 nm 或 473 nm 的激光输出. 这种激光器结构复杂, 体积庞大, 造价高而且稳定性差. 本文采用复合 Nd:YAG 激光晶体, 利用半导体致冷器 TEC (thermoelectrically cooled) 控制温度, 并利用大功率泵浦条件下激光晶体中的热透镜效应, 采用最简单的平凹腔结构, 使激光晶体和倍频晶体分处于两个独立的子腔中, 既实现了激光器的最优模式匹配, 又确保了倍频效率. 在泵浦功率为 15.09 W 时, 利用 LBO 腔内倍频, 得到 473 nm 激光输出功率为 600 mW, 泵浦光→倍频光的光光转换效率达 3.98%. 实现了高效紧凑型蓝光激光器. 由于该激光器结构简单, 稳定性好, 因此

对于实现高效大功率蓝光激光器的产业化具有重要的参考价值.

1 理论分析

1.1 复合 Nd:YAG 晶体

由于 Nd:YAG 晶体的 946 nm 激光谱线的产生属于准三能级系统间的跃迁, 损耗大、阈值高, 因此泵浦功率必须达到很高才能克服下能级的再吸收损耗, 使增益介质实现粒子数反转, 产生 946 nm 激光谱线振荡. 但是随着泵浦功率的逐渐增大, 增益介质的温度会逐渐提高, 按照布耳兹曼分布定律, 下能级的粒子数分布按指数增强, 因此激光器的泵浦光→基频光的光光转换效率会受到极大的影响, 有时甚至会出现振荡被抑制掉的现象. 因此, 对于蓝光激光器, 首要的一点是必须克服大功率泵浦情况下增益介质的散热问题. 目前, 人们最常用的办法是采用水冷装置实现致冷^[4-6]. 此方法需要的设施复杂, 必须有水泵、热交换器和水箱等. 因此这种激光器造价高而且体积大, 携带不方便.

我们采用新型的复合 Nd:YAG 晶体作为增益介质, 在普通半导体致冷器 TEC 的控制下实现了成功致冷. 复合晶体两端的 YAG 晶体与中间掺杂的 Nd:YAG 激光晶体是扩散结合的, 其结构如图 1 所示. YAG 晶体对泵浦光不产生任何吸收作用, 因此,

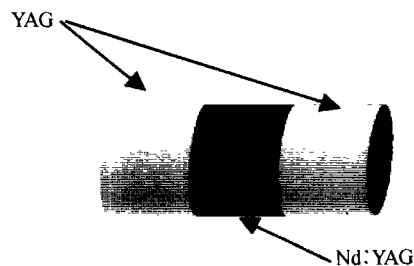


图 1 复合 Nd:YAG 晶体结构示意图
Fig. 1 Schematic of the composite Nd:YAG crystal

*863 课题基金(2002AA311140)资助项目

Email: gll75@163.com

收稿日期: 2003-02-27

复合晶体中的散热主要是通过扩散结合使热从掺杂部分传向不掺杂部分,再通过外部致冷系统把热量散发掉.在物理条件(同一种增益介质,几何尺寸、掺杂浓度相同,相同的功率泵浦等)相同的情况下,激光器采用复合晶体比采用不复合晶体的光光转换效率提高 3 倍^[7].因此利用复合晶体很好的解决了激光增益介质中的热负载问题.

1.2 利用热透镜实现最优模式匹配

大功率泵浦条件下,激光增益介质具有很强的热透镜效应.尽管我们采用了复合晶体,对增益介质热致变形起到了很大的缓解作用.但是大功率端面泵浦条件下,增益介质的热透镜效应不会完全被消除.我们利用它的热透镜效应使激光器在直腔情况下实现了最优模式匹配.

对于大功率端面泵浦的激光器,由于泵浦光束的尺寸较大,一般光束直径都大于 $300\ \mu\text{m}$,因此,采用普通的直腔结构很难实现最优模式匹配(谐振腔的总腔长需大于 $100\ \text{mm}$,此时衍射损耗已非常严重)和保证倍频效率(倍频晶体处基频光束直径需小于 $100\ \mu\text{m}$).通常人们多采用 V 型或 Z 型腔使增益介质和倍频晶体分别处于两个分臂中.这种类型的激光器由于引入折叠镜而使激光束产生像散,为了改善光斑质量,必须加入布氏片等进行像散补偿.这不仅增加了激光器的调节难度,而且增大了腔内损耗.我们利用增益介质在谐振腔中具有热透镜效应的作用,把增益介质等效于一个透镜置于平凹谐振腔中(如图 2),这样在线性谐振腔中就可以实现具有两个光腰,增益介质和倍频晶体分别处于两个子腔中.调节谐振腔的总腔长及增益介质在腔内的位置,通过 ABCD 矩阵计算,就可以设计出既保证激光器实现最优模式匹配,又保证倍频晶体处基频光的高功率密度的谐振腔结构,实现高效倍频.

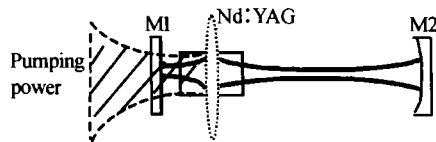


图 2 含热透镜的平凹腔结构

Fig. 2 Schematic of the plane-curved cavity with the thermo-lens

2 实验装置和结果分析

实验装置如图 3 所示.采用德国 Limo 公司生产的大功率 LDA,经光纤耦合后泵浦光的出射光斑直径为 $400\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.22.泵浦光经两个尺寸相同的平凸镜的准值和聚焦后落在复合 Nd:YAG 晶体的中心,平凸镜的焦距为 $10\ \text{mm}$.复合 Nd:YAG 的中间为 $\phi 2\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ 的 Nd:YAG 晶体,掺杂浓度

为 0.9%,其两端分别是光胶的 $\phi 2\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ YAG 晶体(图 1),复合 Nd:YAG 的两端镀 $946\ \text{nm}$ 、 $473\ \text{nm}$ 增透膜.平面镜 M1 的入射端(镀 $946\ \text{nm}$ 高反和 $808\ \text{nm}$ 增透膜)和平凹镜 M2 的凹面(曲率半径为 $100\ \text{mm}$)构成平凹谐振腔.M2 的镀膜要求为 $946\ \text{nm}$ 高反和 $473\ \text{nm}$ 增透,为了抑制 $1064\ \text{nm}$ 的振荡,要求 M2 对 $1064\ \text{nm}$ 的透过率 $> 50\%$.LBO 晶体($2\ \text{mm} \times 2\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$)的两端镀 $946\ \text{nm}$ 、 $473\ \text{nm}$ 增透膜, I 类相位匹配切割.谐振腔的总腔长只有 $45\ \text{mm}$.

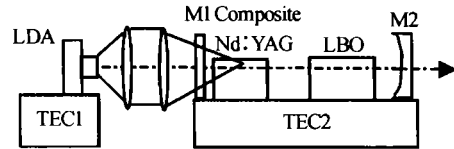


图 3 473 nm 高效紧凑型蓝激光器的平凹腔结构示意图

Fig. 3 Schematic of the plane-curved cavity of 473 nm blue laser

图 4 为激光器的 473 nm 倍频光输出功率随泵浦源 LDA 的工作电流及功率的变化关系图.

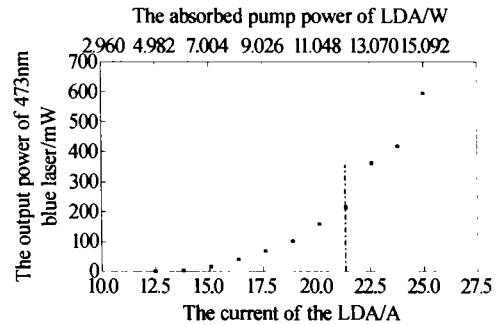


图 4 473 nm 蓝光输出功率随 LDA 工作电流及可吸收泵浦功率的变化

Fig. 4 The output power of 473 nm vs the current of LDA and the absorbed pump power

从图中可以看出,激光器的阈值工作电流为 $12.5\ \text{A}$.随着 LDA 工作电流的增大,倍频光输出功率逐渐增强.但是当电流大于 $21.25\ \text{A}$ 时,泵浦光 \rightarrow 倍频光的光光转换效率明显增强.这主要是因为,我们在设计谐振腔使激光器达到最优模式匹配(即 $\omega_0 \cong 0.8\omega_p$)时^[8],把增益介质的热透镜效应等效于一个透镜来考虑,按照 LDA 工作电流为 $25\ \text{A}$ 情况下,参照增益介质的有关参数进行计算的.当 LDA 工作电流小于 $25\ \text{A}$ 时,增益介质的热透镜效应减弱,等效透镜的焦距变长,此时谐振腔基模在增益介质处的光束半径变小,不再满足谐振腔的最优模式匹配条件,而是 $\omega_0 < 0.8\omega_p$,泵浦光的利用效率会降低,因此影响到倍频光的功率输出.而且,距离这个值越多,热透镜焦距越长,增益介质对泵浦光的利用率越低,因此泵浦光 \rightarrow 倍频光的光光转换效率就越低.当 LDA 工作电流逐渐靠近 $25\ \text{A}$ 时,谐振腔逐渐达到最优模式匹配,泵浦光 \rightarrow 倍频光的光光转换效率就会逐渐增大.在 LDA 工作电流达到 $25\ \text{A}$

时,即可吸收泵浦功率为 15.09 W 时,增益介质的热透镜焦距达到了设计值,激光器实现了最优模式匹配.此时倍频光的输出功率达到最大值,为600 mW,泵浦光→倍频光的光光转换效率为 3.98%.

3 结论

通过理论分析和实验结果,可以看出,对 LDA 泵浦的大功率全固体蓝激光器,采用复合 Nd:YAG 激光晶体,并合理的应用激光晶体的热透镜效应,使激光器在采用线性谐振腔的情况下实现增益介质与倍频晶体分处于两个子腔,激光器既实现了最优模式匹配,又保证了倍频效率.在泵浦功率为15.09 W 时,得到了最大输出功率 600 mW 蓝激光输出,这是国内外该类结构激光器文献报道中最高的蓝光输出功率.此激光器结构简单、紧凑,携带方便且稳定性好,非常适合开发为稳定可靠的产品,因此,在大功率全固体蓝激光器的产业化方面具有很高的参考价值.

参考文献

- 刘伟仁,霍玉晶,何淑芳. Nd³⁺:YAG 的 946 nm 准三能级激光系统理论分析. 光学技术, 2002, 28(4): 319 ~ 321
Liu W R, Huo Y J, He S F. *Optical Technique*, 2002, 28(4): 319 ~ 321
- Barnes N P, Walsh B M, Hutcheson R L, et al. Pulsed ⁴F_{3/2} to ⁴I_{9/2} operation of Nd lasers. *J Opt Soc Am(B)*, 1999, 16(12): 2169 ~ 2177
- Wang Chunwei, Weng Yilung, Huang Piling, et al. Passively Q-switched quasi-three-level laser and its intracavity frequency doubling. *Applied Optics*, 2002, 41(6): 1075 ~ 1081
- Zeller P, Peuser P. Efficient, Multiwatt, continuous-wave laser operation on the ⁴F_{3/2}-⁴I_{9/2} transitions of Nd:YVO₄ and Nd:YAG. *Optics Letters*, 2000, 25(1): 34 ~ 36
- Pierrou M, Laurell F. Generation of 740 mW of blue light by intracavity frequency doubling with a first-order quasi-phase-matched KTiOPO₄ crystal. *Optics Letters*, 1999, 24(4): 205 ~ 207
- Du Geguo, Ruan Shuangchen, Zhu Qin, et al. LD-pumped Nd:YAG laser at 946 nm and frequency doubling. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(11): 1392 ~ 1394
- Tsunekane M, Taguchi N, Inaba H. Efficient 946 nm laser operation of a composite Nd:YAG rod with undoped ends. *Applied Optics*, 1998, 37(24): 5713 ~ 5719
- 武自录,王贤华,陈国夫,等. 双端泵浦固体激光器模式匹配问题的实验研究. 光子学报, 2002, 31(2): 223 ~ 225
Wu Z L, Wang X H, Chen G F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(2): 223 ~ 225

Compact and Efficient 600 mW Blue Laser with a Composite Nd:YAG

Gao Lanlan, Tan Huiming

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130022

Received date: 2003-02-27

Abstract By using a composite Nd:YAG crystal, LBO intracavity doubling in a simple plane-curved cavity, efficient high power blue laser was realized. Through the thermo-lensing effect at LDA high power pumping, the optimum mode-match was attained. The output power at 473 nm was 600 mW with the absorbed pumped power of 15.09 W, and the efficiency was 3.98%.

Keywords Composite Nd:YAG; Compact; Blue laser



Gao Lanlan was born on January 1975, in Hebei, China. She received the B. S. degree in 1997 from Hebei University, China. She is presently pursuing the Ph. D. degree in optics at Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS. She is interested in low-noise and single frequency all-solid-state laser, high power blue laser and so on.