

文章编号: 0258-7025(2004)05-0523-04

1.1 W 连续输出 473 nm 全固态蓝光激光器

王军营, 郑 权, 薛庆华, 檀慧明

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要 报道了光纤耦合激光二极管端面抽运 Nd:YAG 晶体, I 类临界相位匹配 LBO 腔内倍频的 473 nm 全固态蓝光激光器。通过对准三能级系统进行分析, 采用国产普通 Nd:YAG 晶体棒作为工作物质。将热效应因素考虑在内, 设计出对热效应不敏感的短三镜折叠腔, 通过改善致冷条件, 在 14 W 的抽运功率下获得了 1.1 W TEM₀₀ 模连续 473 nm 蓝光输出, 光-光转换效率达 7.9%。阈值仅为 2 W。讨论了获得更高输出功率的可能性。

关键词 激光技术; 蓝光激光器; LD 抽运; 折叠腔; LBO

中图分类号 TN 248.1

文献标识码 A

1.1 W CW Output, All-Solid-States Blue Laser at 473 nm

WANG Jun-ying, ZHENG Quan, XUE Qing-hua, TAN Hui-ming

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract A LD-pumped Nd:YAG, LBO (type-I critical phase matching) intracavity frequency doubled, blue laser at 473 nm is reported in this paper. With the quasi-three-level model and a ordinary Nd:YAG rod as gain medium, by using a short three-folded-cavity resonator that is insensitive to thermal effect, under the condition of 14 W pump power, high power TEM₀₀ mode blue laser at 473 nm of 1.1 W is obtained at last, with the light-light conversion efficiency up to 7.9%, the threshold value is just 2 W. Moreover, the possibility of improving the power is discussed.

Key words laser technique; blue laser; LD pumped; folded resonator; LBO

1 引言

传统的蓝色激光主要是由 Ar⁺ 气体激光器提供, 但因其体积大、效率低、难于维护、价格高等缺陷成为进一步推广的障碍。而激光二极管(LD)抽运连续蓝光激光器因其具有小型高效等优点, 在激光生物医学、激光彩色显示、激光高密度数据存储、激光光谱学、激光打印、激光水下成像与通信等领域得到广泛应用。随着大功率半导体激光器工艺的成熟和提高, 成本的不断降低, 采用激光二极管抽运 Nd:YAG 晶体, 经过非线性晶体倍频获得瓦级输出 473 nm 蓝光的全固态激光器已经成为获得蓝光的一个热点^[1~3]。国外已获得了 1.5 W 的连续 473 nm 蓝

光输出, 而国内才刚刚开始这方面的研究工作^[4]。

在激光二极管抽运 Nd:YAG 晶体, 通过腔内倍频获得的大功率红光(660 nm), 绿光(532 nm), 蓝光(473 nm)三色激光中, 蓝光输出最难获得, 主要原因是它的基频光(946 nm)属于准三能级系统, 而在 Nd:YAG 晶体的三条谱线中 946 nm 的受激发射截面最小, 所以它的光-光转换效率低, 需要更强的抽运功率密度。此外, 在大功率激光运转中, 热效应是影响功率提高和激光输出稳定性的重要原因。大功率蓝光激光器的热效应将会比红光和绿光激光器更明显。本课题组经过长期研究, 采用光纤耦合激光二极管端面抽运国产普通 Nd:YAG 晶体棒, I 类

收稿日期: 2003-01-10; **收到修改稿日期**: 2003-03-20

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(No. 2002AA311141)资助项目。

作者简介: 王军营(1978—), 男, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学工程硕士, 研究方向为全固体激光器件与非线性频率变换技术。E-mail: wangjunying1978@sina.com

临界相位匹配 LBO 腔内倍频,通过改善致冷,采用短三镜折叠腔,在 14 W 的抽运功率下获得了 1.1 W TEM₀₀ 模连续 473 nm 蓝光输出。

2 理论分析

Nd:YAG 存在三条荧光谱线,分别是:1064 nm,1320 nm,946 nm。其中 1064 nm,1320 nm 谱线均属于四能级结构,很容易实现激光运转,经过倍频便可获得 532 nm 绿光,660 nm 红光输出,而 946 nm 谱线属于准三能级系统,对应 ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$ 之间的跃迁实现激光运转非常困难。能级图如图 1 所示^[5],激光下能级是基态的一个斯塔克分裂能级,分裂能级上的粒子数布居服从玻耳兹曼分布率,激光下能级与基态能级的平衡粒子数由公式 $N_1/N_2 = \exp(-\Delta E/kT)$ 决定^[6],其中, ΔE 为两个能级间的能量差, T 为增益介质温度, k 为常数,可见温度越高,下能级热粒子数分布越多,实现粒子数反转也就越困难^[7]。显然,要实现 946 nm 激光运转,降低增益介质的温度是非常必要的。利用传统的闪光灯抽运法,只有在液氮温度下才能实现 946 nm 激光输出。而随着半导体激光器的出现和功率的不断提高,采用激光二极管做抽运源实现了 946 nm 准三能级激光器在常温下的运转。其原因主要在于:抽运光的波长更接近于发射激光的波长,减少了量子亏损发热;LD 抽运光的带宽只有 3 nm 左右,激活离子吸收带范围之外的抽运辐射造成的基质材料的发热也完全消除了。例如:当输出的激光相同时,二极管抽运 Nd:YAG 激光器中的晶体的发热量仅为闪光灯抽运系统的 1/3。

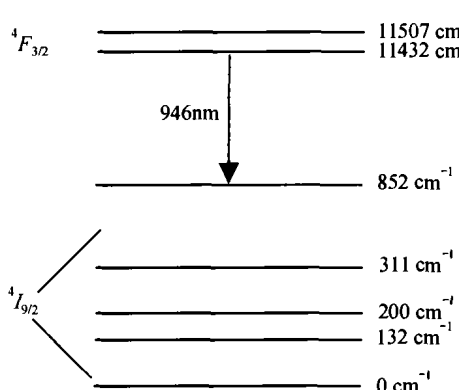


图 1 Nd:YAG 准三能级示意图

Fig. 1 Quasi-three-level diagram of Nd:YAG

由于 Nd:YAG 在 946 nm 波段处存在较为严重

的再吸收,选取激光晶体时必须根据掺杂浓度来优化晶体长度。在端面抽运条件下,实验选取的 Nd:YAG(掺杂 1.0 at.-%)晶体厚度为 3 mm,从而避免了再吸收引起的腔内损耗^[8]。

蓝光倍频常用的非线性倍频晶体为 KN 及 LBO 晶体,虽然 KN 晶体具有有效非线性系数大 ($d_{\text{eff(LBO)}} = 0.812 \text{ pm/V}$, $d_{\text{eff(KN)}} = 10.2 \text{ pm/V}$) 的优点,但其允许温度范围及最大接受角均比 LBO 小得多(LBO 允许温度范围与最大接受角分别为: $7.29 \text{ K} \cdot \text{cm}$, $5.21 \text{ mrad} \cdot \text{cm}$, KN 晶体对应的参数分别为: $0.49 \text{ K} \cdot \text{cm}$, $0.89 \text{ mrad} \cdot \text{cm}$),在实际工艺中控制困难。实际上,倘若有意缩小通过 LBO 的基频光斑半径,即提高基频光功率密度,可以弥补 LBO 非线性系数小的缺点,同样能得到较高的倍频效率。

在端面抽运情况下,可将激光晶体视为一个薄透镜,在 14 W 的抽运功率下其热焦距计算得 180 mm^[9]。考虑到热透镜效应的补偿,抽运能量的充分利用,以及 LBO 倍频效率的提高^[10],采用标准 ABCD 传输矩阵理论,通过计算机辅助优化设计,选取第 1 分臂长为 72 mm,第 2 分臂长为 29 mm。该腔型为热稳定腔,第 1 分臂、第 2 分臂光腰尺寸随热焦距的变化曲线如图 2 所示。

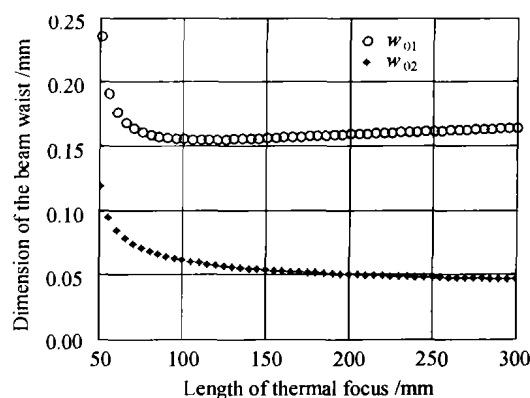


图 2 各分臂光腰随热焦距的变化

Fig. 2 Curve of the beam waist versus the length of thermal focus

3 实验装置与讨论

实验中采用光纤耦合端面抽运方式,三镜折叠腔结构。采用端面抽运方式,抽运光与基频光之间模式空间交叠好,可充分利用抽运能量;并且,高的抽运功率密度克服了准三能级系统阈值高的缺陷。实验装置如图 3 所示。

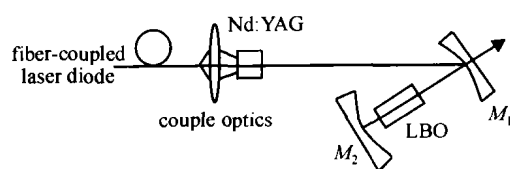


图 3 光纤耦合 LD 抽运 Nd:YAG/LBO 蓝光激光器装置

Fig. 3 Setup of LD pumped Nd:YAG/LBO blue laser

抽运源为最大输出功率 15 W 的光纤耦合半导体激光器(型号为:OPC-B015-FCPS),在室温下,发射中心波长 806.6 nm。抽运光经过准直聚焦系统后会聚成直径为 400 μm 的聚焦光斑注入到工作物质内部,输出镜 M_1 的曲率半径为 50 mm,凹面镀 946 nm 高反(HR),473 nm 抗反(AR)双色膜,第 2 分臂全反镜 M_2 曲率半径 200 mm,凹面镀 946/473 nm HR 膜层。第 1 分臂长为 72 mm,第 2 分臂长为 29 mm。

实验中增益介质 Nd:YAG 晶体($\phi 4\text{ mm} \times 3\text{ mm}$)左端镀 808 nm AR/946 nm HR 膜作为一个端镜使用,另一端镀 946 nm AR 膜。由于 946 nm 谱线属于准三能级系统,下能级粒子数布居受温度影响严重。因此,致冷是一个非常重要的问题。国内外所采用的 Nd:YAG 晶体棒一般是在其两端采用离子交换技术分别粘合一块等尺寸的未掺杂 YAG^[1~3],使增益介质内部产生的一部分热通过端面传给未掺杂 YAG,最终达到致冷的目的,其结构如图 4(a)所示。这种复合式 YAG 棒的确有助于改善致冷效果,但价格极其昂贵,不利于产品化。实际上,只要能使激光晶体侧面与晶体座保持紧密接触,同样能很好地将热量导出,达到改善致冷的目的。实验中采用国内生产的普通 Nd:YAG 晶体棒,结构如图 4(b)所示,将其安装在金属座上。由于晶体与金属座之间存在热阻,需在两者之间裹上一层铝箔,以达到紧密接触的目的。此外,Nd:YAG 晶体侧面为未抛光的毛面,这增加了与铝箔的接触面积,也有利于导热。增益介质中的热量传给晶体座,再通过

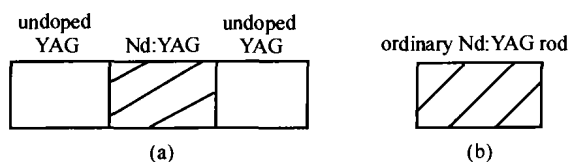


图 4 YAG 棒结构

(a) 复合型;(b) 普通型

Fig. 4 Structure of the composited YAG rod (a) and structure of the ordinary YAG rod (b)

半导体致冷块导出至散热片,最后通过涡流风扇被空气吹走。空气冷却较之循环水冷却具有体积小、结构简单等优点。

倍频器件采用 I 类临界相位匹配(角度匹配) LBO 晶体(3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 9 mm),两端面均镀以 946 nm/473 nm AR 双色膜,置于第 2 分臂光腰处。

4 实验结果

实验中,通过温度调谐,使 LD 发射波长与 Nd:YAG 的中心吸收波长 808.5 nm 重合,精细调节各元件至最佳状态,测得激光阈值为 2 W,在 14 W 的抽运功率下,获得了最大输出 1.1 W TEM₀₀ 模连续 473 nm 蓝光输出,光-光转换效率 7.9%。同时测得了输出功率与注入电流(抽运功率与注入电流成正比)的变化关系,测量数据点及拟合曲线如图 5 所示。蓝光输出功率随抽运电流的增加基本呈平方关系增长,未出现饱和,如果进一步加大抽运电流,蓝光输出功率将进一步增加。

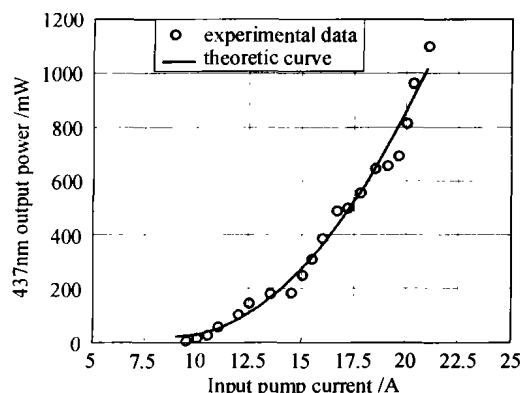


图 5 蓝光激光器输入输出关系实验数据点及其拟合曲线

Fig. 5 Experimental data and theoretic curve of input-output of blue laser

实验中也发现,蓝光运转的同时,在 Nd:YAG 晶体内部激光经过的轨迹上,淡黄色的荧光仍很明显^[11](对应能级 $^4G_{7/2} - ^4I_{11/2}$ 之间的跃迁)。这是由于 946 nm 谱线激光下能级存在热粒子数布居,为了实现激光运转,上能级必须有足够多的粒子数分布,从而增加了上转换的几率,产生大量的荧光辐射。由此可见,如果在现有良好致冷条件下,进一步加大致冷,就可继续减少激光下能级的热粒子数分布,从而有望获得更大的输出功率。

参 考 文 献

- 1 Tim Kellner, Frank Heine, Günter Huber *et al.*, Passive Q-switching of a diode-pumped 946-nm Nd:YAG laser with 1.6-W average output power [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(30):7076~7079
- 2 Masaki Tsunekane, Noboru Taguchi, Humio Inaba. Efficient 946-nm laser operation of a composite Nd:YAG rod with undoped ends [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(24):5713~5719
- 3 P. Zeller, P. Peuser. Efficient, multiwatt, continuous-wave laser operation on the $^4F_{3/2} - ^4I_{9/2}$ transitions of Nd:YVO₄ and Nd:YAG [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1):34~36
- 4 Zheng Quan, Zhao Ling, Shao Yonghong *et al.*, Cr:YAG passively Q-switched all-solid-state blue laser at 473 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):673~676
郑 权,赵 岭,邵永红等. Cr:YAG 被动调 Q 全固态 473 nm 蓝光激光器[J]. 中国激光, 2003, **30**(8):673~676
- 5 Chun-Wei Wang, Yi-Lung Weng, Pi-Ling Huang *et al.*, Passively Q-switched quasi-three-level laser and its intracavity frequency doubling [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(6):1075~1081
- 6 Walter Koechner (author), Sun Wen (translator). Solid-State Laser Engineer [M]. Beijing: Science Press, 2002. 14~18
W. 克希耐尔 著,孙 文 译. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社, 2002. 14~18
- 7 Changhwan Lim, Yasukazu Izawa. Modeling of end-pumped CW quasi-three-level lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(3):306~311
- 8 F. Hanson. Efficient operation of a room-temperature Nd:YAG 946-nm laser pumped with multiple diode arrays [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(2):148~150
- 9 Yung-Fu Chen, S. W. Tsai. Diode-pumped Q-switched Nd:YVO₄ yellow laser with intracavity sum-frequency mixing [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(6):397~399
- 10 Zheng Quan, Zhao Ling, Tan Hui-ming *et al.*, LD-pumped high efficient folded cavity YAG/LBO blue laser [J]. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(3):144~146
郑 权,赵 岭,檀慧明等. LD 泵浦的高效率折叠腔 YAG/LBO 蓝光激光器[J]. 激光与红外, 2001, **31**(3):144~146
- 11 Feng Yan, Song Feng, Zhao Li-juan *et al.*, Upconversion in Nd:YVO₄ crystal under LD pump and its influence [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(2):335~340
冯 衍,宋 峰,赵丽娟等. LD 抽运 Nd:YVO₄ 晶体中的上转换及其影响 [J]. 物理学报, 2001, **50**(2):335~340

征 订 启 事

《光学手册》

顾问:龚祖同 主编:李景镇 陕西科学技术出版社 16 开 1541 页 定价:100.00 元

本手册是我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有 2700 多个公式,1400 余幅插图和 400 多个数据表格,230 万字。手册包括 25 个光学分科(辐射度学和光度学,色度学,光谱学,光源,成象光学,信息光学,量子光学,统计光学,分子光学,非线性光学,光的偏振,光学薄膜和滤光片,纤维光学和变折射光学,集成光学,视觉光学,大气光学,海洋光学,高速摄影和光子学,显微物镜和目镜,光学调制器,热探测器和光电探测器,感光材料,光学计量仪器,光学材料,光学工艺学),5 个附录,2 个索引。由 20 多位光学专家编撰完成,在编写过程中得到了龚祖同、王大珩、侯洵、薛鸣球等著名光学专家的指导和帮助,保证了该手册的编写质量和权威性。资料丰富,表达方式详略得当,是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。

《第十六届全国激光会议论文集》

第十六届全国激光学术会议于 2003 年 10 月 19~22 日在上海举行,会议论文集由《中国激光》编辑部出版。本论文集共收录论文 173 篇,600 多页。定价为每册 100 元,光盘版为每张 50 元。

论文集较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果,显示了激光科学技术对国家 863 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

《第八届国际光电子和光通信学术会议(OECC'2003)论文集》

第八届国际光电子和光通信学术会议于 2003 年 10 月 13~16 日在上海举行,会议论文集由《光学学报》编辑部出版。本论文集共收录论文 436 篇,800 多页,分上下两册。定价为每套 100 元,光盘版为每张 50 元。

对该论文集 OECC 会议节目委员会的评价是:质量之高,可与国际上知名的优秀论文集媲美。

如需购买,请与光学期刊联合编辑部葛晓红联系。

电话:021-69918428,021-69918011,请从邮局汇款

地址:上海 800-211 信箱,光学期刊联合编辑部 邮编:201800