

文章编号: 0253-2239(2007)10-1817-4

紧凑的新型 Yb:GdYAB 自倍频激光器*

薛迎红¹ 王清月¹ 李 静² 刘庆文¹ 王继扬² 柴 路¹

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)
(² 山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

摘要: 报道了一种新型自倍频晶体 Yb:Gd_{0.2}Y_{0.75}(BO₃)₄ (Yb:GdYAB) 在二极管激光器端面抽运条件下的连续光激光运转。为了实现紧凑的新型全固态激光器的激光运转, 设计了一个平平谐振腔, 两个镜子的分开距离仅为 1 cm, 在这种腔结构下, 得到了中心波长为 1044 nm 的基频激光输出, 当吸收抽运功率为 4.22 W 时, 基频激光的最大输出功率为 1.38 W, 相应功率曲线最大斜效率为 54%。为获得有效的自倍频激光输出, 换用了平凹腔进行了自倍频实验。自倍频光运转阈值仅为 900 mW, 在吸收抽运功率为 3.9 W 的条件下, 得到 144 mW 的自倍频绿色激光输出, 获得从二极管激光器到绿光的直接光-光转换效率为 3.7%。实验结果表明 Yb:GdYAB 作为一种新型的自倍频晶体, 对于紧凑的 1 μm 波段的基频光和自倍频可见光激光器都有着很大的应用潜力。

关键词: 激光器; 自倍频; Yb:GdYAB 晶体; 二极管激光器抽运

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

A Novel Microchip Self-Double-Frequency Laser

Xue Yinghong¹ Wang Qingyue¹ Li Jing² Liu Qingwen¹ Wang Jiyang² Chai Lu¹

(¹ College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072)
(² State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

Abstract: The continuum-wave laser operation of a new self-frequency-doubled Yb:Gd_{0.2}Y_{0.75}(BO₃)₄ (Yb:GdYAB) crystal under high-power diode-end-pumping was reported. To achieve compact all-solid-state laser's operation, a plane-parallel cavity was employed with two mirrors separated by 1 cm, and obtained the fundamental-wave laser with central wavelength at 1044 nm. The maximal output power of 1.38 W was obtained with an absorbed power of 4.22 W, which corresponded to slope efficiency of 54%. A plano-concave cavity was used to obtain efficient self-frequency-doubled (SFD) generation. Self-frequency-doubled green laser with a center wavelength of 522 nm was also obtained, and the threshold absorbed pump power was only 900 mW. The maximal output power was 144 mW when pumped power was 3.9 W. A diode-to-green optical conversion efficiency of 3.7% was achieved. The results indicate that the Yb:GdYAB crystal is of great potential in applications of both 1 μm fundamental wave and self-frequency-doubled visible light lasers.

Key words: laser; self-frequency-doubled; Yb:GdYAB crystal; diode-laser pumped

1 引 言

近年来, 高亮度高功率 InGaAs 二极管的迅速发展, 主要吸收峰位于 0.9~1.1 μm 波段的掺 Yb³⁺ 增益介质受到了广泛关注^[1~8]。相比于掺 Nd³⁺ 介质, 掺 Yb³⁺ 有着很多优点。首先, 掺 Yb³⁺

介质的上能级寿命长, 量子缺陷小, 可以得到高效率激光输出。其次, 这类晶体能级结构简单, 高浓度掺杂时不会产生浓度猝灭和激发态重吸收等不良作用, 可以使增益介质的长度缩短, 不但使激光系统紧凑, 而且减少了材料色散, 为产生超短脉冲创造了条

* 国家 973 计划(2003CB314904, 2006CB806002)和国家 863 计划(2002AA311030)资助课题。

作者简介: 薛迎红(1978—), 女, 河北景县人, 博士后, 主要从事新型全固态超短脉冲激光技术的产生及其应用。

E-mail: xyh228@eyou.com

导师简介: 王清月(1938—), 男, 河北人, 教授, 博士生导师, 主要从事超短脉冲激光技术在信息科学中的应用。

E-mail: Chywang@tju.edu.cn

收稿日期: 2006-11-27; 收到修改稿日期: 2007-04-09

件。更有意义的是,有些掺 Yb^{3+} 晶体具有很高的非线性系数,可以实现激光自倍频(Self-frequency-doubled, SFD),同时得到基频光和倍频光输出,如 $\text{Yb}:\text{YAB}$ 晶体^[3,5,8]。这种自倍频晶体将激活离子掺入到非线性晶体中,实现了激光和非线性双重功能的结合,不仅扩大了材料的应用范围,而且在激光器设计上也使系统得到很大简化,减少了激光器调节的复杂性,从而使可见光激光器更具有实用性和可操作性。

本文报道了一种新的 $\text{Yb}_{0.05}^{3+}:\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{0.75}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$ ($\text{Yb}:\text{GdYAB}$) 自倍频晶体在激光二极管(Laser diode, LD)抽运条件下的激光特性。采用不同的腔结构,分别实现了 $\text{Yb}:\text{GdYAB}$ 晶体的基频光(1044 nm)和倍频激光(522 nm)输出。

2 $\text{Yb}:\text{GdYAB}$ 晶体的特性

$\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ (YAB)属于三方晶系结构,空间群为 R_{32} ,具有良好的化学稳定性和热机械性。YAB的非中心对称结构和 BO_3 平面共轭基团,使得它具有很强的非线性光学效应,其非线性系数达到 KDP 的四倍($d_{\text{eff}} = 1.4 \text{ pm/V}$),当掺入少量激活离子 Yb^{3+} 时, $\text{Yb}:\text{YAB}$ 便成为一种优秀的自倍频激光晶体,但是由于晶体格位自身的限制,单掺杂的 YAB 晶体相对的生长速度比较慢。近年来,晶体材料研究者发现,对于掺 Nd^{3+} 的 YAB 晶体,当加入一些其它稀土离子,如 Lu^{3+} 、 Gd^{3+} 等进入 $\text{Nd}:\text{YAB}$ 晶体中时,离子的半径和摩尔质量配合更为合理,从而改善晶体的生长和光学质量,使晶体的缺陷减小,甚至局部对称性进一步降低,提高了倍频系数^[1~12]。为此,生长了新的自倍频晶体 $\text{Yb}:\text{GdYAB}$ 并对其进行了激光实验研究,研究结果显示该晶体可以作为一种优良的高效红外激光器和可见光激光器(自倍频的情况下)的增益介质候选者。

实验中的样品按照对 1064 nm 倍频的 I 类相位匹配方向进行垂直切割,尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,通光方向两面抛光没有镀膜。图 1 显示了室温下晶体的吸收和荧光谱,激活离子 Yb^{3+} 的掺杂原子数分数为 5%,基质中代替离子 Gd^{3+} 的掺杂原子数分数为 20%。从图中可以看出晶体的吸收主峰对应于 974 nm 波段,吸收宽度为 22 nm 恰好适合 InGaAs 二极管的有效抽运。荧光带发射覆盖了 1000~1100 nm,较为平坦的光谱曲线给出的半峰全宽(FWHM)约为 50 nm。从光谱结构来看,

$\text{Yb}:\text{GdYAB}$ 晶体要比 $\text{Yb}:\text{YAB}$ 晶体^[8] 的吸收和发射光谱更宽更平,从而更有利于实现高效的超短脉冲输出。

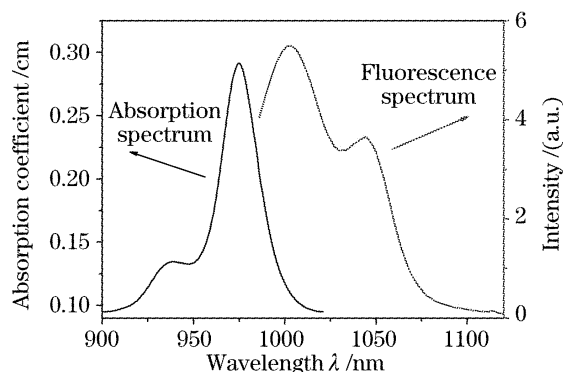


图 1 室温下 $\text{Yb}:\text{GdYAB}$ 晶体的光谱曲线

Fig. 1 Spectra of $\text{Yb}:\text{GdYAB}$ crystal at room temperature

3 基频光实验设计和结果分析

自倍频激光器一个有吸引力的特征是可应用于超压缩可见光光源中的潜力。为了证明 $\text{Yb}:\text{GdYAB}$ 晶体的多功能性,先用两个平面镜组成的平平腔进行基频光测试,如图 2 所示。抽运源为美国 Apollo 公司的 InGaAs 二极管激光器,中心波长为 970 nm。准直后的抽运光用一个焦距为 60 mm 的透镜聚焦,经过平面双色镜 M_1 (波长 970 nm 处透射率大于 85%,波长 1040 nm 处反射率大于 99.2%) 汇聚到晶体内部。实验测得焦点位置的抽运光光斑横向和纵向尺寸分别为 $100 \mu\text{m}$ 和 $400 \mu\text{m}$ 。调节抽运光偏振方向,使晶体的吸收效率最大达到 83%。平面输出镜 M_2 对激光中心波长的透射率为 10%。两平面镜构成的谐振腔主要依赖晶体的热透镜效应实现稳定运转。根据文献[13]的理论,由热透镜公式

$$\frac{1}{f} = \frac{\xi P}{K_c} \left\{ \frac{1}{2\pi\omega_p^2} \left[\frac{dn}{dT} + (n-1)(1+\nu)\alpha_T + n^3\alpha_T C_r \right] \right\},$$

其中, ξ 是吸收的抽运光转换成热的比例, P 是吸收的抽运光功率, K_c 是热导率, ω_p 是抽运光在晶体内的光斑半径, dn/dT 为热色散系数, n 是晶体的折射率, ν 是泊松比, α_T 是热膨胀系数, C_r 为弹光系数。在抽运

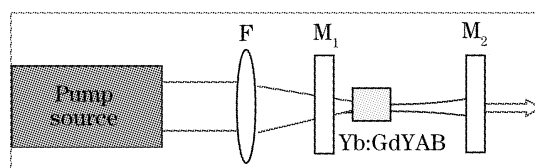


图 2 $\text{Yb}:\text{GdYAB}$ 基频光实验装置

Fig. 2 Setup of $\text{Yb}:\text{GdYAB}$ laser for measurement of fundamental wave

范围之内,计算晶体热透镜的焦距变化在 5~13 cm 之间,为了使谐振腔在实验过程中始终处于稳定状态,选用了短腔结构,即输出镜 M_2 与平面双色镜 M_1 的距离约为 1 cm。另外,计算晶体内基模激光的光斑半径最小为 85 μm ,最大为 105 μm ,接近甚至略大于晶体内抽运光尺寸(横向 100 μm),这种设计保证了激光腔实现 TEM_{00} 模稳定运转。图 3 是实验中拍摄的基模光斑以及用刀口法测量的光强分布曲线,高斯拟合(曲线中的红实线)表明,光强很好地满足了高斯分布关系,是比较理想的 TEM_{00} 模。利用这种简单紧凑的平平腔,实现了 Yb:GdYAB 晶体的激光运转,激光光谱(光谱仪: Ist-rees Laser Spectrum Analyzer)如图 4 所示,其中心波长位于 1044 nm,图 5 给出了 Yb:GdYAB 激光器基频光输出的功率随吸收抽运功率增加的变化曲线,图中显示,吸收抽运功率阈值为 1.57 W;增加吸收抽运功率到 4.22 W 时,获得最大输出功率为 1.38 W,此时光光转换效率达到 32.7%。对该曲线进行线性拟合,最大斜效率达到 54%。因为这种装置激光模尺寸比较大而且基频光的透过率比较大,从而减小了腔内强度,所以在这种装置下,自倍频绿光的功率相对较小。实验结果显示,在 4 W 抽运功率下,倍频光的功率只有 5 mW 左右。

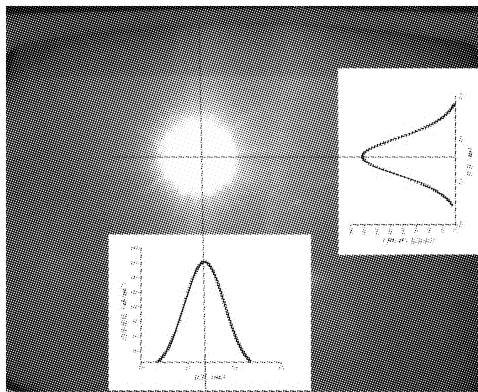


图 3 Yb:GdYAB 基频光输出模式

Fig. 3 Fundamental-wave output mode of Yb:GdYAB laser

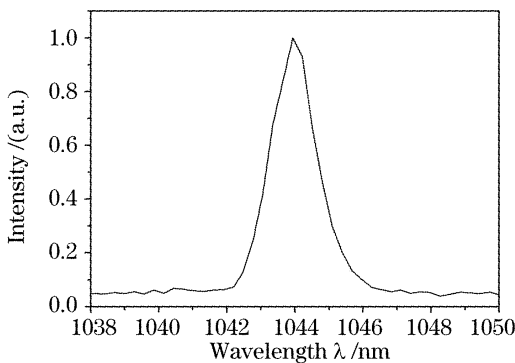


图 4 Yb:GdYAB 激光器连续波基频光光谱

Fig. 4 CW fundamental-wave spectrum of Yb:GdYAB laser

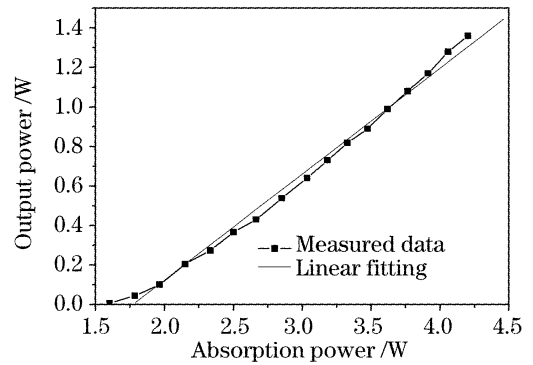


图 5 Yb:GdYAB 红外基频光输出功率随吸收抽运功率增加而变化的曲线

Fig. 5 Curve of Yb:GdYAB IR laser output power at fundamental wave versus absorption power

4 自倍频实验过程和结果讨论

为获得更高自倍频光输出,换用了平凹腔结构,如图 6 所示。

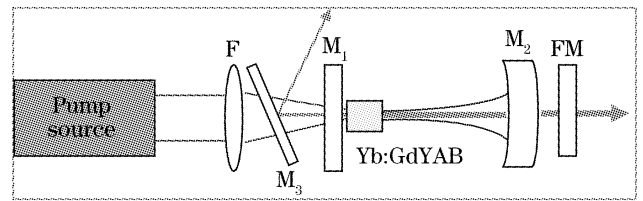


图 6 Yb:GdYAB 自倍频激光器的实验装置图

Fig. 6 Setup of Yb:GdYAB self-frequency-doubled laser

用曲率半径为 $R=70$ mm 的凹面输出镜 M_2 代替了原来的平面输出镜, M_2 镀膜为波长 900~1100 nm 处反射率大于 85%, 波长 500~600 nm 处透射率大于 90%。这种结构有利于提高晶体内基频光的功率密度,以达到更好的倍频效率。此外,为防止从 M_1 后面输出的自倍频绿光返回抽运源,在 F 和 M_1 之间加入了一个平面镜 M_3 , M_3 镀膜为波长 900~1100 nm 处高透, 波长 500~600 nm 处高反。FM 是一个低通滤波片,用于滤掉凹面镜透出的残余抽

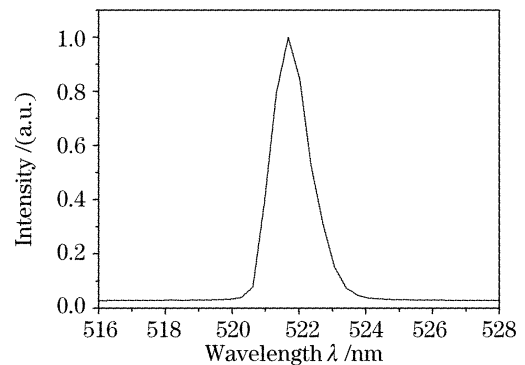


图 7 Yb:GdYAB 自倍频绿光的光谱

Fig. 7 Spectrum of Yb:GdYAB self-frequency-doubled green laser

运光和基频光。在这种设计下,得到了 Yb:GdYAB 自倍频激光器 144 mW 的绿光输出,绿光出现的抽运阈值为 900 mW,从二极管到绿色激光输出最大的光光转换效率为 3.7%。测量自倍频绿色激光的中心波长位于 522 nm,如图 7 所示。图 8 是自倍频绿色激光的输出功率曲线,从图中看出,倍频光的输出功率随吸收抽运光功率的增加基本呈现二次方变化关系。这个实验结果要比从 Nd:GdYAB 微型自倍频激光器^[10]中得到的绿光功率高得多。初步显示了该激光器在简单紧凑的可见光激光器中的发展潜力。

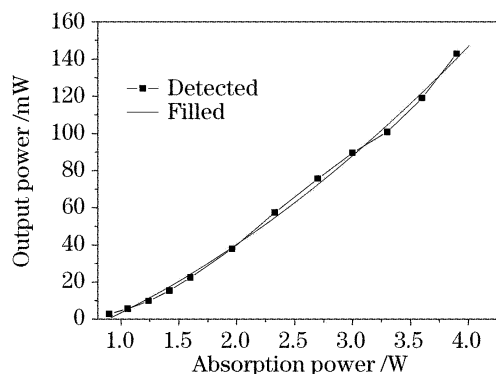


图 8 Yb:GdYAB 自倍频绿光随吸收抽运功率变化曲线
Fig. 8 Curve of Yb:GdYAB self-frequency-doubled green laser output power

5 结 论

介绍了通过不同的腔设计,对激光二极管端面抽运新型 Yb:GdYAB 自倍频激光晶体进行了激光实验。采用简单紧凑的平平腔,当吸收抽运光功率为 1.57 W 时,实现了 Yb:GdYAB 激光器的基频光运转,增加吸收抽运功率到 4.22 W 时,得到最大基频激光输出 1.38 W,相应的最大斜效率为 54%。采用平凹腔结构,激光器的自倍频绿色激光振荡阈值仅为 900 mW,当吸收抽运功率为 3.9 W 时,获得的最大绿色激光输出为 144 mW,从二极管到绿光直接的光光转换效率达到 3.7%。实验结果已经显示,Yb:GdYAB 晶体无论对于 1 μm 波段的红外光激光器还是可见光激光器都是非常有力量的增益介质。

参 考 文 献

- Song Yanrong, Hu Jianghai, Zhou Junfeng *et al.*. Laser diode-pumped Q-switched Yb:LSO laser with semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1297~1300 (in Chinese)
宋宴蓉,胡江海,周劲峰等. 半导体可饱和吸收镜调 Q 的 Yb:LSO 激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1297~1300
- Xu Shixiang, Li Wenxue, Hao Qiang *et al.*. Laser diode-pumped efficient tunable Yb:LYSO laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 799~800 (in Chinese)
徐世祥,李文雪,郝强等. 半导体激光器抽运新型高效调谐 Yb:GYSO 激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 799~800
- Xue Yinghong, Wang Qingyue, Chai Lu *et al.*. Theoretical calculation and evaluation of laser diode pumped quasi-three-level self-frequency-doubled laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1025~1029 (in Chinese)
薛迎红,王清月,柴路等. LD 抽运准三能级自倍频激光器的计算与分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1025~1029
- Haixia Ma, Qihong Lou, Yunfeng Qi *et al.*. Theoretical study on longitudinally pumped Yb³⁺:Y₂O₃ lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(1): 28~30
- Yinghong Xue, Qingyue Wang, Zhigang Zhang *et al.*. Passive mode locking of an Yb:YAB laser with a low modulation depth SESAM[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(8): 466~457
- Y. Zaouter, J. Didierjean, F. Balembois *et al.*. 47-fs diode-pumped Yb³⁺:CaGdAlO₄ laser[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(1): 119~121
- Pu Wang, Peter Dekker, Judith M. Dawes *et al.*. Efficient continuous-wave self-frequency-doubling green diode-pumped Yb:YAl₃(BO₃)₄ lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(10): 731~733
- Pu Wang, Judith M. Dawes, Peter Dekker *et al.*. Growth and evaluation of ytterbium-doped yttrium aluminum borate as a potential self-doubling laser crystal[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(1): 63~69
- Tu Zhaoyang, Li Jianfu, Qiu Minwang *et al.*. Study on laser crystal Nd³⁺:Gd_{0.2}Y_{0.8}Al₃(BO₃)₄ [J]. *J. Synthetic Crystals*, 2000, **29**(4): 310~314 (in Chinese)
涂朝阳,李坚富,邱闽旺等. Nd³⁺:Gd_{0.2}Y_{0.8}Al₃(BO₃)₄ 激光晶体的研究[J]. *人工晶体学报*, 2000, **29**(4): 310~314
- Peter Dekker, Yujing Huo, Judith M. Dawes *et al.*. Continuous wave and Q-switched diode-pumped neodymium, lutetium, yttrium aluminium borate lasers[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **151**: 406~412
- Alain Brenier, Chaoyang Tu, Minwang Qiu *et al.*. Spectroscopic properties, self-frequency doubling, and self-sum frequency mixing in GdAl₃(BO₃)₄:Nd³⁺ [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(8): 1104~1110
- Chaoyang Tu, Yichuan Huang, Minwang Qiu *et al.*. The growth of Nd³⁺:Gd_xY_{1-x}Al₃(BO₃)₄ crystals[J]. *J. Crystal Growth*, 1999, **206**: 249~251
- Wu Dinger, Zhou Rui, Zhang Xiaohua *et al.*. Output characteristics of LD solid-state laser with end-pumped Nd:YVO₄ flat-flat cavity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(3): 1196~1200 (in Chinese)
武丁二,周睿,张晓华等. LD 端抽运平直腔 Nd:YVO₄ 固态激光器的输出功率特性研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(3): 1196~1200