

文章编号: 0258-7025(2008)04-0597-04

Er³⁺:Yb³⁺:GdAl₃(BO₃)₄ 晶体 1.5~1.6 μm 波段激光性能

陈雨金 林炎富 龚兴红 罗遵度 黄艺东

(中国科学院福建物质结构研究所国家光电子晶体材料工程技术研究中心, 福建 福州 350002)

摘要 采用熔盐法获得了 Yb³⁺ 和 Er³⁺ 离子原子数分数分别为 20% 和 1.1% 的 GdAl₃(BO₃)₄ (简称 GAB) 晶体。在平-凹谐振腔中, 利用 0.97 μm 波长光纤耦合连续 (CW) 半导体激光端面抽运 0.7 mm 厚的该晶体, 当输出镜透过率为 1.5% 时, 获得斜率效率为 20%, 最大功率为 1.75 W 的 1.5~1.6 μm 波段激光输出。输出激光波长随吸收抽运功率和输出镜透过率发生变化。当输出镜透过率为 1.5% 时, 随着吸收抽运功率的增加, 不仅起振的纵模带增加并且输出功率逐渐从 1.60 μm 的纵模带中转移到 1.55 μm 的纵模带中。而当吸收抽运功率为 13.6 W 时, 随着输出镜透过率的增加, 输出激光波长从 1.60 μm 转移到 1.52 μm。结果表明 Er³⁺ 和 Yb³⁺ 双掺的 GAB 晶体是一种优秀的 1.5~1.6 μm 波段激光材料。

关键词 材料; Er³⁺:Yb³⁺:GdAl₃(BO₃)₄ 晶体; 1.5~1.6 μm 波段固体激光; 半导体激光抽运

中图分类号 TN 248.1; TN 244 **文献标识码** A

Laser Performance of Er³⁺:Yb³⁺:GdAl₃(BO₃)₄ Crystal at 1.5~1.6 μm

Chen Yujin Lin Yanfu Gong Xinghong Luo Zundu Huang Yidong

(National Engineering Research Center for Optoelectronic Crystalline Materials,

Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract An Er³⁺:Yb³⁺:GdAl₃(BO₃)₄ (GAB) crystal with Yb³⁺ and Er³⁺ atoms fraction of 20% and 1.1% was grown by the flux method. End-pumped by a fiber-coupling quasi-continuous wave (CW) diode laser at 0.97 μm, 1.5~1.6 μm laser with output power up to 1.75 W and slope efficiency near to 20% was realized from a 0.7 mm thick Er³⁺:Yb³⁺:GAB crystal in a hemispherical cavity with the output coupler transmission of 1.5%. The influences of the absorbed pump powers and output coupler transmissions on the laser spectra were also investigated. When the output coupler transmission was 1.5% and the absorbed pump power was increased, more longitudinal mode groups were observed and the main output laser power gradually shifts from the longitudinal mode group around 1.60 μm to around 1.55 μm. When the absorbed pump power was 13.6 W and output coupler transmission was increased, laser wavelength was shifted from 1.60 μm to 1.52 μm. The results show that the Er³⁺ and Yb³⁺ co-doped GAB crystal is an excellent gain medium for realizing 1.5~1.6 μm laser.

Key words materials; Er³⁺:Yb³⁺:GdAl₃(BO₃)₄ crystal; 1.5~1.6 μm laser; laser diode-pumped

1 引 言

1.5~1.6 μm 波段位于良好的大气传输窗口以及室温工作的 Ge 和 InGaAs 等红外探测器的探测

灵敏区, 对人眼安全, 因此该波段激光器可广泛应用于精密测距、精密遥感测量、医学和军事等各个领域^[1~4]。利用半导体激光抽运 Er³⁺ 和 Yb³⁺ 双掺激光材料是直接获得高光束质量 1.5~1.6 μm 波段激

收稿日期: 2007-08-16; 收到修改稿日期: 2007-10-30

基金项目: 国家自然科学基金 (60778015), 福建省重大科技计划 (2005HZ1024), 福建省自然科学基金 (A0610031) 和中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目资助课题。

作者简介: 陈雨金 (1977—), 男, 福建人, 助理研究员, 在职博士研究生, 主要从事固体激光材料和器件研究。

E-mail: cyj@fjirsm.ac.cn

导师简介: 黄艺东 (1964—), 男, 福建人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电子材料和器件研究。

E-mail: huoyd@fjirsm.ac.cn (通信作者)

光的理想方法之一^[1~9]。许多研究结果表明要实现1.5~1.6 μm 波段激光的高效运转,基质材料必须具有较大的声子能量来增强 Yb^{3+} 到 Er^{3+} 离子的正向能量传递并减弱 Er^{3+} 到 Yb^{3+} 离子的反向能量传递以及 Er^{3+} 离子的上转换效应。此外,基质材料还必须具有良好的热机械性能,减小在抽运和激光运转过程中产生的热量对激光性能的影响,使其具有较高的激光损伤阈值和输出功率^[2,3]。

$\text{RAl}_3(\text{BO}_3)_4$ (RAB, R = Y 或者 Gd) 晶体具有大的声子能量(大约 1400 cm^{-1}),是一种适合 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 双掺并能实现1.5~1.6 μm 激光有效运转的基质晶体材料^[4,5]。RAB 晶体还具有良好的热机械性能,其热导率值为 $4.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[10]。本文利用准连续半导体激光抽运 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 双掺 $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ (简称 GAB) 晶体,实现了高效和高功率的1.5~1.6 μm 波段激光运转。

2 材料性质和实验装置

采用熔盐法获得了 Yb^{3+} 和 Er^{3+} 离子原子数分数分别为 20% 和 1.1% 的 GAB 晶体。图 1 给出了该晶体在 850~1100 nm 波长之间的室温偏振吸收谱。当入射光的偏振方向垂直于晶体 c 轴时(σ 偏振),该晶体在 976 nm 峰值波长处的吸收系数为 39 cm^{-1} ,远大于偏振方向平行于 c 轴(π 偏振)的 934 nm 峰值波长处的吸收系数 4.5 cm^{-1} 。另外,该吸收带的吸收峰半峰全宽(FWHM)为 20 nm,可以有效地减小因温度变化引起的半导体激光发射波长漂移对晶体吸收效率的影响。因此, $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ 晶体是一种适合半导体激光沿 c 轴端面抽运的增益介质。

实验采用端面抽运的平-凹腔。厚度为 0.7 mm

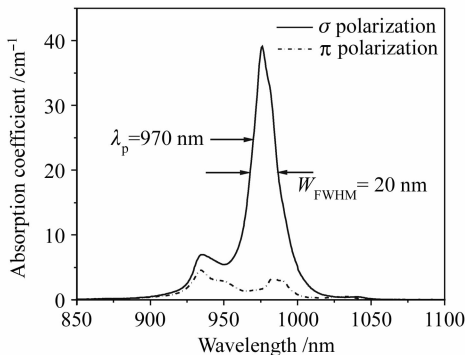


图 1 室温下 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ 晶体 850~1100 nm 波段的偏振吸收谱

Fig. 1 Room-temperature polarized absorption spectra of $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ crystal in a range of 850~1100 nm

的 c 切片未镀增透膜 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ 晶体固定在铝基座上。抽运源为多模光纤耦合半导体激光器,发射波长为 $0.97 \mu\text{m}$,纤芯直径为 $800 \mu\text{m}$ 。抽运光经透镜组聚焦后,在晶体上的抽运光光斑半径为 $145 \mu\text{m}$ 。平面输入腔镜在 $0.97 \mu\text{m}$ 处的透过率为 90%,1.5~1.6 μm 处的反射率为 99.8%。四片出射腔镜的曲率半径均为 50 mm,在 1.5~1.6 μm 处的透过率分别为 0.8%,1.5%,2.6% 和 4.1%,在 $0.97 \mu\text{m}$ 处的反射率均高于 98%。激光腔的长度约为 50 mm。实验中未对晶体采取冷却措施,为了减小热效应对激光运转效果的影响^[11],半导体激光器采用准连续工作模式,占空比为 2%,调制频率为 10 Hz。

3 结果与讨论

图 2 给出了不同输出镜透过率下 1.5~1.6 μm 准连续(CW)激光输出功率随 $0.97 \mu\text{m}$ 吸收抽运功率的变化。考虑到采用准连续抽运方式,图中的功率均为测量值乘以 50 后的数值。对于 1.5% 透过率的出射腔镜,吸收抽运阈值功率为 3.75 W,斜率效率接近于 20%。当吸收抽运功率为 13.6 W 时,输出功率达到 1.75 W,10 min 内输出功率的漂移小于 $\pm 3.0\%$ 。从图 2 还可以发现,对于所有的出射腔镜,在本实验的最高吸收抽运功率下,均未出现输出功率的饱和现象。因此,若采用更高功率的抽运光,将可以获得更高的输出功率。实验结果也表明 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ 晶体最佳的出射腔镜透过率应该在 1.5% 左右。不同输出镜透过率下的实验数据值列于表 1。

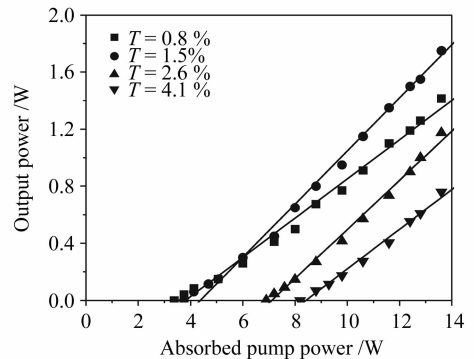


图 2 不同输出镜透过率下 1.5~1.6 μm 准连续激光输出功率随 $0.97 \mu\text{m}$ 吸收抽运功率的变化

Fig. 2 1.5~1.6 μm quasi-CW laser output powers versus absorbed pump powers at $0.97 \mu\text{m}$ for $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ crystal at different output coupler transmissions

表 1 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ 激光器不同输出镜透过率下的实验数据Table 1 Experimental results of $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ crystal for different output coupler transmission

Output coupler transmissions / %	0.8	1.5	2.6	4.1
Absorbed pump thresholds / W	3.4	3.75	6.9	8.2
Output powers at the absorbed pump power of 13.6 W / W	1.42	1.75	1.18	0.76
Slope efficiencies / %	13	20	17	14

当输出镜透过率为 1.5% 时,采用单色仪 (Triax550, Jobin-Yvon) 测量了不同吸收抽运功率下的激光光谱,如图 3 所示。当吸收抽运功率低于 7.0 W 时,只有一个中心波长在 $1.60\ \mu\text{m}$ 的纵模带。随着吸收抽运功率的增加,出现了另外两个中心波长分别位于 $1.58\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 的纵模带。而且随着吸收抽运功率的增加, $1.55\ \mu\text{m}$ 波长的纵模带强度逐渐增强。表明输出激光功率逐渐从 $1.60\ \mu\text{m}$ 的纵模带中转移到 $1.55\ \mu\text{m}$ 的纵模带中。

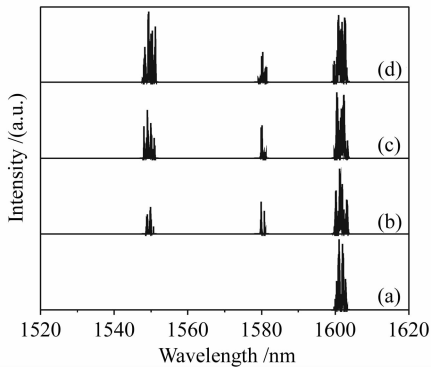


图 3 输出镜透过率为 1.5% 时, $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ 晶体输出激光光谱随 $0.97\ \mu\text{m}$ 吸收抽运功率的变化

Fig. 3 When the transmission of the output coupler is 1.5%, spectra of the $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ laser versus the absorbed pump powers. (a) 7.0 W; (b) 9.0 W; (c) 11.0 W; (d) 13.6 W

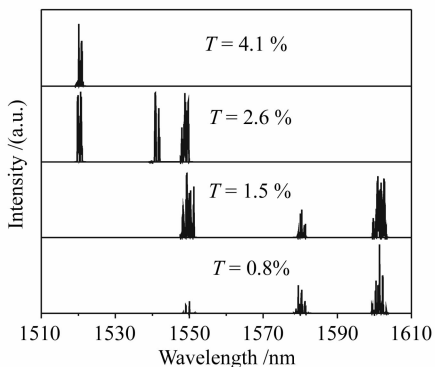


图 4 $0.97\ \mu\text{m}$ 吸收抽运功率为 13.6 W 时, $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ 晶体输出激光光谱随输出镜透过率 T 的变化

Fig. 4 When the absorbed pump power is 13.6 W, spectra of the $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ laser versus the transmissions of the output couplers

$\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ 晶体输出激光光谱也随输出镜透过率发生变化,图 4 为 13.6 W 吸收抽运功率时的测量结果。当输出镜透过率为 0.8% 时,输出激光功率主要集中在 $1.60\ \mu\text{m}$ 的纵模带中。随着输出镜透过率的增加,输出激光功率逐渐向短波方向转移。当输出镜透过率增加到 4.1% 时,输出激光功率则主要集中在 $1.52\ \mu\text{m}$ 的纵模带中。输出激光波长随吸收抽运功率和输出镜透过率变化主要是由激光腔的增益和损耗的改变而引起的^[4,12]。

4 结 论

采用 $0.97\ \mu\text{m}$ 光纤耦合半导体激光抽运 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ 晶体,实现了高效和高输出功率的 $1.5\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 准连续激光输出,输出的最大功率为 1.75 W,斜率效率为 20%。对于 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ 晶体,最佳的出射腔镜透过率应该在 1.5% 左右。另外, $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ 晶体的输出激光波长随吸收抽运功率和输出镜透过率发生变化。因此,通过合理设计 $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{GAB}$ 激光器的工作条件,可以在 $1.52\sim 1.60\ \mu\text{m}$ 的波长范围内获得不同的激光工作波长。实验结果也表明 Er^{3+} 和 Yb^{3+} 双掺的 $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ 晶体是一种优秀的 $1.5\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 波段激光材料。

参 考 文 献

- P. Laporta, S. Taccheo, S. Longhi *et al.*. Erbium-ytterbium microlasers: optical properties and lasing characteristics [J]. *Opt. Mater.*, 1999, **11**(2-3):269~288
- Phillip A. Burns, Judith M. Dawes, Peter Dekker *et al.*. Optimization of Er, Yb: YCOB for CW laser operation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(11):1575~1582
- B. Denker, B. Galagan, L. Ivleva *et al.*. Luminescence and laser properties of Yb-Er: GdCa₄O(BO₃)₃: a new crystal for eye-safe 1.5- μm lasers [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(5):577~581
- Y. J. Chen, Y. F. Lin, X. H. Gong *et al.*. 2.0 W diode-pumped Er:Yb:YAl₃(BO₃)₄ laser at 1.5~1.6 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(24):241111
- Y. J. Chen, Y. F. Lin, X. H. Gong *et al.*. 1.1 W diode-pumped Er:Yb laser at 1520 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(18):2759~2761
- Shilong Zhao, Shunguang Li, Lili Hu *et al.*. Er³⁺/Yb³⁺ codoped phosphate glass laser end-pumped by laser diode [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4):228~229

- 7 Yuxi Liu, Xiaoxia Zhang, Ying Li *et al.*. Properties of steady-state in Er^{3+} - Yb^{3+} co-doped phosphate glass for optical waveguide laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7):418~421
- 8 Chen Li, He Dongbing, Li Shunguang *et al.*. Laser properties of Cr, Yb, Er co-doped phosphate glass [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):272~276
陈 力,何东兵,李顺光等. 铬镱钕共掺磷酸盐玻璃的激光性质[J]. 中国激光, 2007, **34**(2):272~276
- 9 Liu Yange, Feng Xinhuan, Dong Xiaoyi. Progress in room-temperature stable multi-wavelength fiber laser technologies [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7):883~894
刘艳格,冯新焕,董孝义. 室温稳定多波长光纤激光器技术的研究新进展[J]. 中国激光, 2007, **34**(7):883~894
- 10 J. L. Blows, P. Dekker, P. Wang *et al.*. Thermal lensing measurements and thermal conductivity of $\text{Yb}:\text{YAB}$ [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **76**(3):289~292
- 11 F. Auge, F. Druon, F. Balembois *et al.*. Theoretical and experimental investigation of a diode-pumped quasi-three-level laser: the Yb^{3+} -doped $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3(\text{Yb}:\text{GdCOB})$ laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(5):598~606
- 12 S. Taccheo, P. Laporta, C. Svelto. Widely tunable single-frequency erbium-ytterbium phosphate glass laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(19):2621~2623