

文章编号: 0258-7025(2005)07-0881-04

低温下运行的光纤耦合激光二极管抽运 Tm, Ho: YLF 激光器

姚宝权, 王月珠, 贺万骏, 李玉峰, 鞠有伦

(哈尔滨工业大学可调谐激光国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 为了实现小型化、高功率、高效率连续 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出, 采用中心波长 $792\ \text{nm}$ 激光二极管(LD)抽运双掺杂 Tm, Ho: YLF 晶体, 将晶体封装在装有 $350\ \text{mL}$ 液氮的杜瓦装置中, 使其工作在 $77\ \text{K}$ 温度条件下。光纤耦合激光二极管出纤功率 $14.8\ \text{W}$, 数值孔径 0.3 , 芯径 $400\ \mu\text{m}$ 。激光二极管端面抽运 Tm, Ho: YLF 激光器, 产生 $2.05\ \mu\text{m}$ 线偏振连续激光输出, 最大功率 $5.2\ \text{W}$ 。由于 Tm^{3+} 离子能级间的交叉弛豫效应导致的高抽运量子效率, 实验获得的光-光转换效率为 35% , 斜度效率达到 40% 。采用双端面抽运结构, 两个激光二极管注入功率 $29.6\ \text{W}$ 时, Tm, Ho: YLF 激光器输出功率达 $10.2\ \text{W}$, 相当于光-光转换效率 33% , 斜度效率 36% 。

关键词 激光技术; 固体激光器; 激光二极管抽运; 光纤耦合; Tm, Ho: YLF 激光器; 低温

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

High Efficient CW Tm, Ho: YLF Laser Pumped by Fiber-Coupled Diodes

YAO Bao-quan, WANG Yue-zhu, HE Wan-jun, LI Yu-feng, JU You-lun

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract In this paper, a high power of cryogenic Tm(8 at.-%), Ho(1.4 at.-%): YLF end-pumped by a fiber-coupled laser diode (LD) with number aperture of 0.3 , core diameter of $0.4\ \text{mm}$, and central wavelength of $792\ \text{nm}$ at $20\ \text{C}$ temperature is reported. The highest continuous-wave (CW) power of $5.2\ \text{W}$ at $2.05\ \mu\text{m}$ is achieved under pump power of $14.8\ \text{W}$, corresponding to optical-optical conversion efficiency of 35% , and the slope efficiency is greater than 40% . The threshold power is only about $0.48\ \text{W}$ because of the long lifetime, large effective emission cross section, and low reabsorption loss in Tm, Ho: YLF crystal. Under pumping power of $29.6\ \text{W}$ with dual-end pumping configuration, the highest CW power of $10.2\ \text{W}$ at $2.051\ \mu\text{m}$ is attained, corresponding to optical-optical conversion efficiency of 33% , and the slope efficiency is greater than 36% .

Key words laser technique; solid state laser; LD pumping; fiber-coupled; Tm, Ho: YLF laser; cryogenic operation

1 引 言

激光二极管(LD)抽运 Tm, Ho: YLF 激光器研究有两大需求推动: 1) 人眼安全的相干多普勒测风雷达的应用^[1,2]。2) 中红外 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 光学参量振荡器(OPO)的需求及发展促进 $2\ \mu\text{m}$ 激光器的发展^[3,4]。 $2\ \mu\text{m}$ 激光器是中红外 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 光学参量振荡器最适宜的抽运源, 它具有量子缺损小、转换效率高的特点, 随着激光二极管抽运技术的发展, 能够做到小型化、全固化。 $2.05\ \mu\text{m}$ 的波长接近液体

水的吸收波长 $1.94\ \mu\text{m}$, 水对 $2\ \mu\text{m}$ 激光吸收强于 $1\ \mu\text{m}$ 的掺 Nd 激光器。 $2\ \mu\text{m}$ 的激光对人体组织的一次穿透深度为 $0.1\sim 0.2\ \text{mm}$, 有很高的外科手术精度, 可用普通石英光纤传输, 因而它是一种很好的激光外科手术光源。

激光二极管抽运高功率、高能量、单纵模稳频 Tm, Ho 激光器研究已取得较大进展。美国劳伦斯·利弗莫尔(Lawrence Livermore)实验室研究的激光二极管抽运 Tm: YAG 激光器最大输出功率达到

收稿日期: 2004-06-29; 收到修改稿日期: 2004-12-29

基金项目: 哈尔滨工业大学校基金(HIT-2002-14)资助项目。

作者简介: 姚宝权(1970—), 男, 哈尔滨工业大学可调谐激光国家级重点实验室副研究员, 主要从事固体激光器及非线性频率转换的研究。E-mail: bqyao@mail.hl.cn

115 W^[5], 室温下运行的激光二极管抽运 Q 开关 Tm, Ho: YLF 激光器, 最大输出能量 700 mJ^[6]。2001 年, 日本 C. Nagasawa 等研究了单频微片 Tm, Ho: YLF 激光器, 室温条件下输出功率 6 mW, 测量的频率波动范围相对带宽为 11 kHz, 满足 0.1 m/s 的测风精度要求^[7]。意大利的 P. Laporta 等利用侧边锁定技术, 将单频 Tm, Ho: YAG 振荡锁定在 HBr 分子 P(12) 吸收线上, 在 60 min 的观测时间内, 长期频率稳定性好于 32 kHz^[8]。

我们曾研究了室温条件下, 激光二极管抽运 Tm, Ho: YLF 微片激光器, 输出功率达到 300 mW^[9], 利用 Tm, Ho: GdVO₄ 激光介质产生 3.5 W 2.048 μm 激光输出^[10]。由于常温下, Ho 激光为准三能级系统, 重吸收损耗导致高阈值, 高激发态粒子数产生严重的上转换损耗, Tm, Ho 之间的传递速率低等因素限制了其高效运行。采用液氮制冷方式, 能使激光晶体工作在 100 K 温度以下, 激光能级系统类似于 Nd 激光器的四能级系统, 从而降低抽运功率阈值及热效应对激光器性能的影响。激光二极管的单色性使其能够精确对准晶体吸收峰, 纵向抽运光束与激光光束空间上重叠好, 激光器能够达到近量子极限的转换效率。由于转换效率高, 制冷激光二极管抽运的 Tm, Ho 晶体的液氮不需要采用循环压缩方式, 正常气化就可以带走斯托克斯频移和光束不完全重叠所产生的热。

2 理论分析

2.1 晶体特性

氟化钪锂晶体 (YLF) 分子式为 LiYF₄, 属于四方晶系。YLF 晶体有两个等价的 a 轴和一个 c 轴。a 轴晶体随着偏振的选择可获得两种波长的激光, 一种是电矢量方向平行于 c 轴的 π 偏振光; 另一种是电矢量方向垂直于 c 轴的 σ 偏振光。晶体沿 a 轴方向的热膨胀系数为 13.3 × 10⁻⁶ K⁻¹, 大于 c 轴方向上的热膨胀系数为 8.3 × 10⁻⁶ K⁻¹。这种晶体的特点是在紫外光谱区吸收损耗小, 非线性折射系数小, 非常适合于三价稀土金属离子 (例如 Tm³⁺, Ho³⁺) 的掺杂。

掺有三价稀土离子的 YLF 晶体有较高的光存储容量。在同样抽运条件下 YLF 的热透镜效应只有 YAG 的 1/10。且 YLF 为自然双折射, 线偏振输出, 没有 YAG 基质的热致双折射损耗。但是 YLF 晶体为各向异性的, 应力系数也不是各向同性的, 热

畸变是不规则的。

2.2 Tm³⁺ 能级的交叉弛豫特性

Tm, Ho 激光介质中, 若 Tm³⁺ 的掺杂原子数分数在典型的 3%~12% 之间, 被激发的相邻离子之间就可能发生交叉弛豫: 一种交叉弛豫形式是与 ³H₄ 多重态的一个 Tm 原子发生, 另一种是 ³H₆ 与基态的一个 Tm 原子发生; 当 ³H₄ 态发生量子弛豫时, ³H₆ 态的量子被激发到 ³F₄ 多重态上, 因而一个在 ³H₄ 多重态上被激发的量子在 ³F₄ 产生两个被激发的量子, 因此理论抽运量子效率为 2。Tm³⁺ 的 ³F₄ 能级粒子将能量传递给 Ho³⁺ 的 ⁵I₇ 能级, 2.05 μm 的激光作用发生在 Ho³⁺ 中的 ⁵I₇ 和 ⁵I₈ 能级之间。

2.3 激光阈值计算

根据准三能级的激光器理论, 计算端面抽运的 Tm, Ho: YLF 阈值公式为^[11]

$$P_{th} = \frac{\pi hc(\omega_l^2 + \omega_p^2) * (L + T_{out} + 2f_1 N_{Ho} \sigma_1 l)}{4(f_u + f_l) \sigma_1 \tau \lambda_p \eta_p}, \quad (1)$$

式中 h 为普朗克常数, c 为光速, ω_l 为激光束腰半径, ω_p 为抽运光半径, L 为腔内损耗, T_{out} 为输出镜透射率, f_1 为 Ho³⁺ 激光下能级某一斯塔克能级占 ⁵I₈ 整个能级的粒子数比值, f_u 为激光上能级某一斯塔克能级的粒子数占整个 ⁵I₇ 能级粒子数的比值, N_{Ho} 为 Ho³⁺ 离子数密度 (cm⁻³), σ_1 为受激发射截面 (cm²), τ 为激光上能级寿命, λ_p 为抽运光波长, η_p 为抽运光吸收效率。计算中, $T_{out} = 0.4$, $\lambda_p = 792$ nm, $\tau = 15$ ms, $\eta_p = 0.95$, $\sigma_1 = 1.5 \times 10^{-19}$ cm²。

图 1 为纵向抽运 Tm, Ho: YLF 激光器阈值与晶体温度的关系。随着温度的降低, $1 + f_l/f_u$ 的值不断减小, 低温条件下, 该系数接近于 1, 此时准三能级系统变为四能级系统。在反转到上能级的粒子数密度很小的条件下就能实现粒子数反转和较高的增益, 同时低的上激发态粒子数密度能够有效减小上转换损耗。从图 1 还可以看出, 晶体温度越高, 则对 Ho³⁺ 离子掺杂原子数分数较高 (1.4%) 的 Tm, Ho: YLF 激光器阈值功率影响越大 (相比较掺 Ho³⁺ 离子掺杂原子数分数为 0.5% 的 Ho: YLF 而言), 而在低温条件下, 二者的阈值功率差别很小。Tm, Ho: YLF 激光器抽运阈值功率与晶体温度关系是在液氮快消耗完, 晶体温度开始上升时测量, 由于杜瓦温度不可控, 因此实验测量值与计算值有一定误差, 只有温度较稳定的低温和高温状态下吻合较好。Ho³⁺ 掺杂原子数分数高, 有利于提高低温条

件下的激光增益系数, 实现 $2\ \mu\text{m}$ 激光的高功率、高效率运行。而在室温条件下, 需要降低 Ho^{3+} 掺杂原子数分数至 $0.3\% \sim 0.4\%$, 并根据抽运功率优化晶体长度, 进而实现 Tm, Ho: YLF 激光的高性能运行。

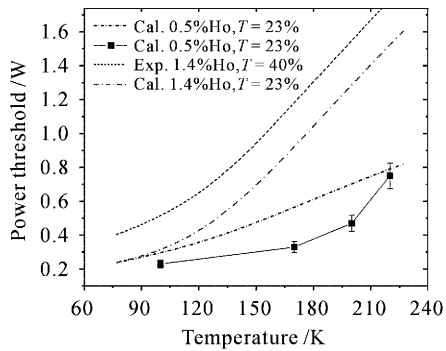


图 1 计算和实验测量的不同晶体温度、不同掺杂 Ho^{3+} 离子原子数分数以及不同输出耦合率对 Tm, Ho: YLF 激光器阈值功率的影响

Fig. 1 Calculated and measured threshold power of Tm, Ho: YLF versus crystal temperature for different Ho^{3+} -doped concentration and output coupler transmissivity

3 实验

3.1 实验装置

激光二极管纵向抽运的 Tm, Ho: YLF 激光器的结构如图 2 所示。 Tm, Ho 激光器的抽运源波长不同于通用的 $808\ \text{nm}$ 激光器, 我们选用了美国相干公司的无铝 $20\ \text{W}$ 阵列半导体激光器线阵, 中心波长 $793.6\ \text{nm}$ ($25\ ^\circ\text{C}$), 线宽小于 $2\ \text{nm}$ 。采用武汉凌云光电科技有限责任公司单模光纤耦合技术, 激光二极管到光纤的耦合效率达到 70% 以上, 数值孔径 0.3 , 芯径 $400\ \mu\text{m}$, $23.5\ \text{A}$ 工作电流下最大出纤功率 $14.8\ \text{W}$ 。由于 YLF 基质热脆裂极限低, 通过准直聚焦透镜, 将聚焦到晶体中的抽运光斑直径放大 1.4 倍。抽运光经过光学耦合系统的传输效率是 95% 。杜瓦窗口靠近激光二极管端为输入镜, 对 $2.05\ \mu\text{m}$ 激光的反射率为 99.5% , 对 $792\ \text{nm}$ 抽运光透过率为 96.5% ; 输出镜是曲率半径为 $300\ \text{mm}$ 的平凹镜, 输出耦合透射率为 40% 。

激光工作物质采用较长的 Tm, Ho: YLF 激光晶体, 晶体尺寸为 $5\ \text{mm} \times 5\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$, 掺杂原子数分数是 $\text{Tm}: 8\%, \text{Ho}: 1.4\%$ 。激光晶体的两个端面都经过严格的光学研磨, 并镀 $792\ \text{nm}$ 和 $2050\ \text{nm}$ 双增透膜。晶体沿 a 轴生长, $[100]$ 方向切割, c 轴

与端面平行并与一个侧面垂直。此晶体既可以单端抽运, 又适合两端面同时抽运, 如图 2 所示。晶体用钢箔包裹安装在与液氮接触的紫铜冷头中。

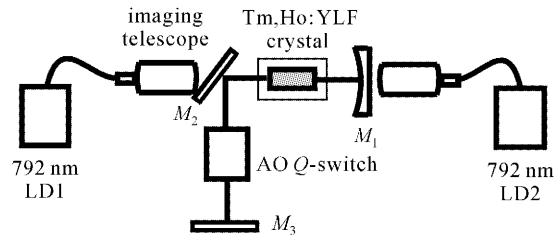


图 2 激光二极管纵向抽运的 Tm, Ho: YLF 实验装置图

M_1 : 输入镜; M_2 : 45° 折反镜; M_3 : 输出耦合镜

Fig. 2 Schematic of the Tm, Ho: YLF laser configuration in LD end-pumped experiments

M_1 : input mirror; M_2 : 45° fold mirror; M_3 : output coupler

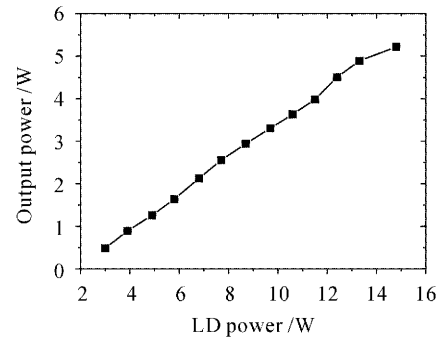


图 3 单端抽运直线腔 Tm, Ho: YLF 激光输出功率与激光二极管功率的关系

Fig. 3 Output power of linear cavity Tm, Ho: YLF laser versus LD power with single-end pumping configuration

3.2 实验结果与讨论

当晶体温度为 $77\ \text{K}$ 时, 单端面抽运直线腔 Tm, Ho: YLF 激光器抽运功率和 $2\ \mu\text{m}$ 激光输出功率的关系曲线如图 3 所示。测量仪器采用最大量程为 $2\ \text{W}$ 的 LPE-1A 型功率计, 并采用透射率为 8.3% 的分束片限制进入到探头内的激光功率, 避免超出功率计的测量范围。当激光二极管电流达到 $8.5\ \text{A}$ 时, Tm, Ho: YLF 开始产生稳定激光振荡, 测量达到阈值时激光二极管输出功率约为 $0.48\ \text{W}$, 略大于利用公式(1)计算的抽运阈值功率 $0.4\ \text{W}$ 。当抽运功率为 $14.8\ \text{W}$ 时, Tm, Ho 激光输出功率为 $5.2\ \text{W}$, 光-光转换效率达 35% , 实验数据线性拟合得到斜率效率为 40% 。输出光经格兰棱镜检偏, 为平行于 c 轴的线偏振激光。线偏振对实现腔内声光 Q 开关元件的高效调制损耗是非常重要的。用 WDG30 光栅单色仪 (光栅 $600\ \text{条}/\text{mm}$) 和光导型

PbS 探测器监测斩波信号,测量激光输出波长为 $2.05 \mu\text{m}$ 。

计算掺杂原子数分数为 8% Tm:YLF 吸收系数为 7.3 cm^{-1} ,室温下测量,10 mm 长晶体对 792 nm 激光的吸收效率在 95% 以上。1.4% 高原子数分数掺杂的 Ho^{3+} 离子浓度为 $1.96 \times 10^{20} / \text{cm}^3$,在 77 K 温度下,往返自吸收损耗为 3.4%,加上腔内由于晶体端面、窗口材料的吸收和反射、输入镜的反射损耗等,腔内总损耗约 5%。不考虑 Tm^{3+} 离子的弛豫特性,计算的 Tm, Ho:YLF 激光斜度效率为 34%。本实验达到的 40% 的斜度效率远大于该值,说明 Tm^{3+} 弛豫特性对提高 Tm, Ho 激光效率起到至关重要的作用,理论斜度效率 68%,接近 Nd 激光器。

计算表明,由于光纤耦合激光二极管光束质量差,激光腔内激光模和抽运激光模有效耦合长度仅有 3 mm。单端抽运不能够有效运用晶体的有效长度,特别是高原子数分数 Ho^{3+} 掺杂晶体,晶体中没有被抽运的部分对 $2 \mu\text{m}$ 振荡光重吸收,并导致晶体的热负载严重。折叠腔由于腔长长,45° 光束折反镜产生约 1% 的透射损耗,单端抽运输出功率仅 4.5 W。双端面抽运总输出功率达到 10.2 W (如图 4),大于单端抽运的 2 倍功率,多出的功率正是由于晶体另一端被抽运而变得对 $2 \mu\text{m}$ 激光更透明,整个腔内损耗减小引起的。

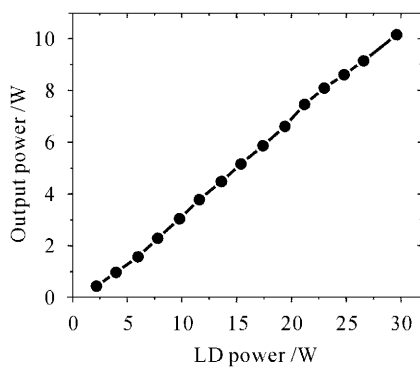


图 4 连续双端面抽运 Tm, Ho:YLF 激光器输出功率与激光二极管功率的关系

Fig. 4 CW output power of dual-end-pumped Tm, Ho:YLF laser versus double-LD power

4 结 论

低温下对光纤耦合激光二极管抽运的 Tm, Ho

:YLF 激光器进行实验研究,实现了高效 $2 \mu\text{m}$ 激光输出,光-光转换效率为 35%,斜度效率为 40%。实验及理论分析表明,温度对激光器的性能影响较大,准三能级 Tm, Ho:YLF 激光系统在低温下可近似为四能级,抽运阈值功率降低。双端面抽运是增加 Tm, Ho:YLF 激光器的有效手段,总输出功率达到了 10 W 以上。

参 考 文 献

- Jirong Yu, Upendra N. Singh, Norman P. Barnes *et al.*. An all solid-state $2\text{-}\mu\text{m}$ laser system for space coherent wind lidar [C]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2000, **3**:27~33
- B. T. McGuckin, R. T. Menzies, H. Hemmati. Efficient energy extraction from a diode-pumped Q-switched Tm, Ho:YLF₄ laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(23):2926~2928
- P. A. Budni, L. A. Pomeranz, M. L. Lemons *et al.*. 10 W mid-IR holmium pumped ZnGeP₂ OPO [C]. *Advanced Solid-State Lasers, OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 1998, **19**:226~229
- Yao Baoquan, He Wanjun, Li Yufeng *et al.*. Technical study of ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a $2 \mu\text{m}$ Tm, Ho:YLF laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):39~42
姚宝权,贺万俊,李玉峰等. $2 \mu\text{m}$ Tm, Ho:YLF 激光抽运 ZnGeP₂ 光参量振荡技术研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1):39~42
- Eric C. Honeas, Raymond J. Beach, Steven B. Sutton *et al.*. 115-W Tm:YAG diode-pumped solid-state laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(9):1592~1600
- Williams-Byrd, Julie A., Singh, Upendra N., Barnes, Norman P. *et al.*. Room-temperature, diode-pumped Ho:Tm:YLF laser amplifiers generating 700 mJ at $2\text{-}\mu\text{m}$ [C]. *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 1997, **10**:199
- C. Nagasawa, T. Suzuki, H. Nakajima *et al.*. Characteristics of single longitudinal mode oscillation of the $2 \mu\text{m}$ Tm, Ho:YLF microchip laser [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **200**:315~319
- P. Laporta, M. Marano, L. Pallaro *et al.*. Amplitude and frequency stabilisation of a Tm-Ho:YAG laser for coherent lidar applications at $2.1 \mu\text{m}$ [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, **37**(5):447~457
- Yao Baoquan, Dong Liqiang, Wang Yuezhu *et al.*. Experimental study of microchip (Tm, Ho):YLF laser pumped by laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1):79~83
姚宝权,董力强,王月珠等. 激光二极管抽运 (Tm, Ho):YLF 微片激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1):79~83
- Baoquan Yao, Xingbao Zhang, Yuezhu Wang *et al.*. LD pumped $2\text{-}\mu\text{m}$ CW laser from Tm, Ho:GdVO₄ [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(10):595~596
- W. P. Risk. Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(7):1412~1423