

光纤耦合二极管端泵 2 μm CW 双掺 Tm, Ho : GdVO₄ 激光器

姚宝权 张兴宝 王月珠 贺万俊 李玉峰 鞠有论

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘要 同 YLF 和 YAG 基质相比, 在 Tm-Ho : GdVO₄ 晶体中 Tm³⁺ 离子在 800 nm 附近有非常强的和宽的吸收带, 所以该晶体非常适合商品化的 GaAlAs 激光二极管泵浦. 在液氮制冷晶体条件下, 利用光纤耦合激光二极管及消色差光学耦合系统端面泵浦双掺 5% Tm, 0.5% Ho : GdVO₄ 晶体, 在泵浦功率 14 W、泵浦波长 794 nm 时, 实现了 2.048 μm 激光输出, 连续运转输出功率 3.6 W, 相应的光光转换效率为 25.7%, 斜率效率 26.6%. 相对于吸收的泵浦功率, 光光转换效率为 35%. 由于 Tm³⁺ 离子间的交叉弛豫效应, 泵浦量子效率达到 1.3.

关键词 光纤耦合激光二极管; Tm, Ho : GdVO₄ 晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

人眼安全的二极管泵浦 2 μm 钛激光器由于其 在遥感探测、差分吸收雷达、医学诊断等方面的应用, 以及可以作为中红外光参量振荡器的泵浦源而引起人们极大的兴趣. 在过去的几十年, 二极管泵浦 Tm : Ho 激光得到了快速发展, 但大功率 2 μm 双掺 Tm-Ho : GdVO₄ 激光器鲜有文献报道. Wyss^[2,3] 等人对 Tm : GdVO₄ 激光进行了研究, Morris^[1] 使用 Ti : sapphire 激光泵浦 Tm, Ho : GdVO₄ 晶体, 实现 2 μm 输出, 但斜率效率低, 只有 3.4%. Ho³⁺ 离子的 ⁵I₇-⁵I₈ 激光辐射跃迁产生 2 μm 激光, ⁵I₈ 是基态, 在温度超过 80 K, 热致粒子数布居使 Ho³⁺ 的 Stark 下能级的粒子数增加, 所以阈值增大. Ho³⁺ 离子对 792 nm 波长附近的吸收非常弱, 在晶体中掺敏化离子 Tm³⁺, Tm³⁺ 在 792 nm 附近有强的吸收, Tm³⁺ 离子吸收泵浦光从基态 ³H₆ 跃迁到激发态 ³H₄, 然后交叉弛豫到 ³F₄, 一个光子被吸收后, 两个 Tm³⁺ 离子布居在 ³F₄, 再通过 Tm³⁺ 和 Ho³⁺ 的交叉弛豫过程, 能量从 Tm³⁺ 转移到邻近的 Ho³⁺ 离子. 本文报道了光纤耦合激光二极管泵 3.6 W Tm-Ho : GdVO₄ 激光器的实验结果.

1 光纤耦合激光二极管端面泵浦 Tm, Ho : GdVO₄ 激光器实验

1.1 Tm, Ho : GdVO₄ 晶体物理和光谱特性

GdVO₄ 晶体属于四方晶系, 具有锆英石结构,

单晶轴, 密度为 5.48 g/cm³, 熔点为 1800℃, 晶格常数为 a=0.7212 nm, b=0.6350 nm, 每个单胞中有 4 个 GdVO₄. 表 1 例出了几种晶体的热导率. 在高功率二极管端泵情况, 晶体内的热效应严重影响激光的输出功率. GdVO₄ 晶体具有大的热传导率, 所以能有效的冷却晶体, 降低热效应对输出功率的影响. Tm : YAG 和 Tm : YLF 激光晶体中, Tm³⁺ 离子的吸收带宽窄, 在小的吸收系数和长的基质材料中, 为了使泵浦光和激光有效重叠, 这就要求泵浦光数值孔径要小. 以 GdVO₄ 作为激光基质材料的使用为解决这些问题提供了可能, 因为在 GdVO₄ 晶体中稀土离子有大吸收横截面积. 图 1 的吸收光谱

表 1 热导率

Crystal	direction	K(W · m ⁻¹ K ⁻¹) at 300K
GdVO ₄	∥ c	12.3
GdVO ₄ : Tm	∥ c	9.7
GdVO ₄ : Ho, Tm	∥ c	9.9
YLF : Ho, Tm	∥ c	4.3~6.0
YVO ₄	∥ c	5.2
YAG : Cr, Ho, Tm	<001>	12.0
YAG : Ho, Tm	<001>	6.6~13

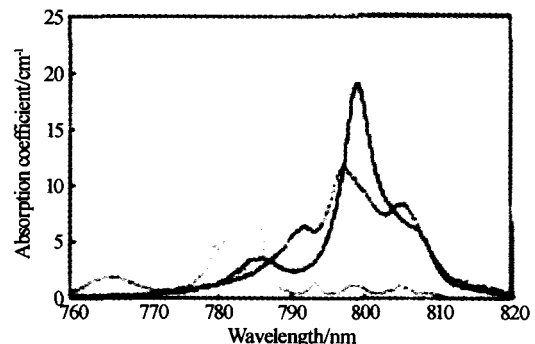


图 1 Tm, Ho : GdVO₄ 和 Tm, Ho : YAG 吸收光谱
Fig. 1 Absorption spectra of 5.7% Tm, 0.36% Ho : YAG and 4% Tm, 0.5% Ho : YAG

显示 4% Tm, 0.5% Ho : GdVO₄ 近 809 nm 的吸收比 5.7% Tm, 0.36% Ho : YAG(770~820 nm) 强和宽; GdVO₄ 晶体的吸收系数近似 YAG 晶体的两倍. GdVO₄ 中 Tm 离子大的吸收截面体现了适合于微片激光器和端面泵浦激光器的优势. 宽的吸收带意味着输出功率受 LD 温度变化引起的波长漂移的影响小, 因此对泵浦二极管波长的依赖性降低; 同时非常短的晶体也能够被使用. 此外, 宽的激发光谱(1.9~2.1 μm)^[1], 使激光波长可调, 有利于短脉冲运转.

1.2 实验装置

实验装置如图 2. 腔型采用平凹腔结构, 输入镜为平凹镜, 曲率半径为 -400 mm, 它对 792 nm 泵浦光高透 ($T > 96\%$), 对 2 μm 激光全反 ($R = 99.5\%$); 输出镜为平面镜, 对 2 μm 激光透过率为 40%, 总的腔长大约 15 cm. 5% Tm, 0.5% Ho : GdVO₄ 激光晶体尺寸为 4 mm × 4 mm × 7 mm, a 轴切割, 采用导热性能很好的紫铜作为晶体的热沉. 晶体由铜箔 (100 μm 厚) 包裹放在热沉上, 放入由液氮致冷的杜瓦瓶装置中. 晶体温度能降到 80 K, 在晶体制冷前, 杜瓦瓶抽真空到 5.2 Pa. 光纤耦合二极管为泵浦源, 最大的输出 15 W, 调整二极管温度, 设定为 28℃, 使光纤输出中心波长在 794 nm, 接近 Tm³⁺ 吸收峰 797 nm, 泵浦光随机偏振. 光纤数值孔径 0.3, 芯径 0.4 mm. 两个消色差透镜焦距分别 35 mm, 50 mm, 泵浦光经消色差透镜聚焦到晶体上, 平均光斑径为 0.28 mm.

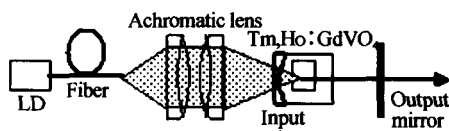


图 2 光纤耦合二极管端面泵浦 Tm, Ho : GdVO₄ 激光
Fig. 2 Schematic diagram of a fiber-coupled diode end pumped Tm, Ho : GdVO₄ laser

使用中科院物理所的 LPE-1A 型功率计测量激光输出功率. 输出激光波长在 2 μm 附近, 利用光导型红外探测器 PbS 和前置放大器, 以及 WDG-50 光栅单色仪配合 TDS380 示波器对激光输出波长进行测量. 把光栅单色仪的入口正对谐振腔的出口, 在光栅单色仪的出口端放置探测器, 它采集到的信号输入到示波器中, 通过示波器观察信号. 测量时针对不同的波长选用不同的光栅, 实验时转动光栅单色仪鼓轮, 当观察到信号时读出鼓轮读数即可得出波长值.

2 实验结果与讨论

实验中用肉眼可直接观测到绿色的荧光, 对应于离子从 $^2S_2 \rightarrow ^5I_6$ 540 nm 跃迁, 如图 3 能级图.

Tm³⁺ 离子被泵浦激发到 3H_4 能级, 然后通过非辐射和辐射跃迁到 3F_4 能级; 能量通过交叉弛豫从 Tm 离子转移到 Ho 离子, 即 $Tm^{3+} : ^3F_4 + Ho^{3+} : ^5I_6 \rightarrow Tm^{3+} : ^3H_6 + Ho^{3+} : ^5I_7$; 离子 $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ 跃迁产生 2 μm 激光. 同时 $Ho^{3+} : ^5I_7$ 离子通过激发态吸收和上转换弛豫到 5S_2 , 离子从 $^2S_2 \rightarrow ^5I_8$ 跃迁就会产生 540 nm 绿荧光. 双掺 Tm-Ho 比单掺 Ho 或 Tm 激光更容易发生上转换过程^[6,7], 而且 Tm³⁺ 离子与 Ho³⁺ 离子浓度的比值影响激光的输出特性, 文献 [2] 没有实现 2 μm 激光输出, 其 Tm/Ho 比值为 13.8, 该实验分析是强的浓度淬灭效应导致无激光输出, 浓度淬灭通过激发态吸收和交叉弛豫两个上转换过程引起的. 降低上转换效应, 可以提高激光效率, 因此在设计 Tm, Ho : GdVO₄ 激光器时存在一个最佳浓度问题. 在光纤耦合 LD 端泵浦双掺 Tm, Ho : GdVO₄ 晶体实验中, 在泵浦功率 14 W 时, 实现 3.6 W 功率输出, 泵浦功率阈值 1.7 W, 相应的光光转换效率为 25.7%. 转换效率比文献 [1] 报道的 3.4% 要高. 阈值比单掺 Tm : GdVO₄ 激光器^[2] (310 mW) 高, 主要是由于上述分析的双掺 Tm-Ho 比单掺 Ho 或 Tm 激光更容易发生上转换的原因引起的. 另外, 文献 [8] 给出在泵浦波长为 797 nm 时, 阈值为 670 mW, 在泵浦波长为 806 nm 时, 阈值为 790 mW, 由于 Tm 宽的吸收带宽 (770~820 nm) 的优势, 所以泵浦波长对阈值影响不大.

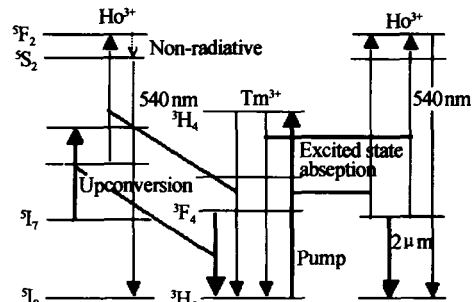


图 3 Tm-Ho 能级图

Fig. 3 Energy level scheme of Tm-Ho

图 4 为连续 Tm, Ho : GdVO₄ 激光器输出功率和 LD 输入电流的关系, 功率随电流增加而线性增加, 斜率为 0.26 W/A. LD 出纤光功率随电流增加的斜率为 0.94 W/A, 计算 2 μm 激光输出功率随 LD 功率增加的斜率效率为 26.6%. 由于光学耦合系统和输入镜对泵浦光的损耗, 测量入射到激光晶体内部的泵浦功率约 12.7 W, 而吸收的泵浦功率约 10.2 W. 相对于吸收的泵浦功率, Tm, Ho : GdVO₄ 激光器的光光转换效率为 35%, 斜率效率接近 50%, 大于量子极限转换效率 ($\eta_c = \eta_p \cdot \lambda_p / \lambda_l$, $\eta_p = 1$) 38.7%, 说明 Tm³⁺ 之间的 1→2 弛豫效应 (即一个泵浦光子产

生两个 3F_4 激发态粒子)使得泵浦量子效率大于1,达到1.3.图4中,当采用物像比为1:1的光学耦合系统时,严重的热效应影响 $Tm, Ho: GdVO_4$ 激光器的高功率运行.但同时也表明, $Tm, Ho: GdVO_4$ 晶体能够承受的泵浦功率密度大于 10 kW/cm^2 ,大于 $Tm, Ho: YLF$ 的 5 kW/cm^2 ,说明该晶体有好的热机械性能,具有满足大功率运行的品质.

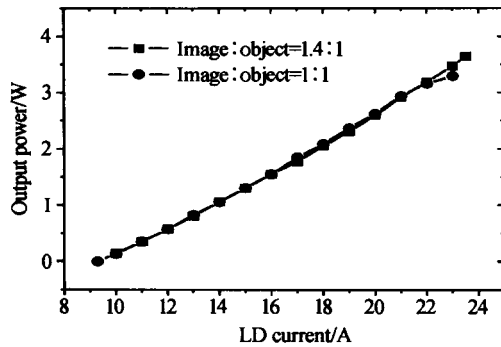


图4 $Tm, Ho: GdVO_4$ 激光输出功率与 LD 电流关系
Fig. 4 Output power of $Tm, Ho: GdVO_4$ laser versus current of LD

图5显示 $Tm, Ho: GdVO_4$ 激光输出功率与LD工作温度的关系,激光二极管温度在 $18\sim 30^\circ\text{C}$ 温度范围内,激光输出功率变化为 0.5 W ,最佳温度在 28°C 附近.实验结果表明,输出功率受二极管温度变化影响不大,显示了 $Tm, Ho: GdVO_4$ 晶体宽的吸收带的优越性.同时也表明,如果采用波长接近 $Tm, Ho: GdVO_4$ 晶体吸收峰 800 nm 附近的LD泵浦,会获得更高的转换效率.

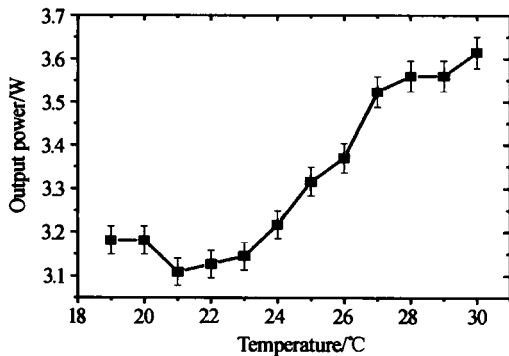


图5 $Tm, Ho: GdVO_4$ 输出功率与 LD 工作温度关系
Fig. 5 $Tm, Ho: GdVO_4$ output power versus temperature of LD

3 结论

在二极管泵浦、小型化、高效率且能产生红外激光的材料中,以 $GdVO_4$ 为基质掺入稀土离子 Tm, Ho 的激光晶体被认为是很有前途的材料,其优点是吸收系数和受激发射截面大,LD由于温度变化引起波长漂移对输出功率影响不大,而且 $GdVO_4$ 有比 YLF, YVO_4 大的热导率($11.7\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ at 300 K),晶体热效应小.通过光纤耦合激光二极管端面泵浦双掺 $Tm, Ho: GdVO_4$ 激光器实验,实现了 $2\text{ }\mu\text{m}$ 激光输出,在 14 W 时,最大激光输出功率为 3.6 W ,相应的光光转换效率为 25.7% ,实验测得的斜率效率是 26.6% .

参考文献

- Morris P J, Luthy W, Weber H P, *et al.* Laser operation and spectroscopy of $Tm, Ho: GdVO_4$. *Opt Commun*, 1994, **111**: 493~496
- Wyss C P, Luthy W, Weber H P, *et al.* Performance of a $Tm^{3+}: GdVO_4$ microchip laser at $1.9\text{ }\mu\text{m}$. *Opt Commun*, 1998, **153**(1): 63~67
- Wyss C P, Luthy W, Weber H P, *et al.* A Diode-pumped $1.4\text{ W } Tm^{3+}: GdVO_4$ microchip laser at $1.9\text{ }\mu\text{m}$. *IEEE J Quantum Electron*, 1998, **34**(12): 2380~2382
- Zagumennyi A I, Zavartsev Yu D, Studenikin P A, *et al.* Thermal conductivity of a $Tm^{3+}: GdVO_4$ crystal and the operational characteristics of a microchip laser based on it. *Quantum Electron*, 1999, **29**(4): 298~300
- Gunnar Rustad, Knut Stenersen. Low threshold laser diode side pumped $Tm: YAG$ and $Tm, Ho: YAG$ laser. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, **33**(1): 82~88
- Fan T Y, Huber G, Byer R L, *et al.* Spectroscopy and diode laser pumped operation of $Tm, Ho: YAG$. *IEEE J Quantum Electron*, 1988, **24**(6): 924~933
- Falconieri M, Lanzi A, Salvetti G. Spectroscopic investigation of the visible and mid-infrared emission in Tm - and Ho -doped YAG and YLF crystals. CLEO, Lasers and Electro-optics Europe, conference;
- Wyss C P, Luthy W, Weber H P, *et al.* Emission properties of a $Tm^{3+}: GdVO_4$ microchip laser at $1.9\text{ }\mu\text{m}$. *Appl Phys B*, 1998, **67**(5): 545~548

Fiber-coupled Diode End-pumped Double Tm, Ho : GdVO₄ Laser

Yao Baoquan, Zhang Xingbao, Wang Yuezhu, He Wanjun, Li Yufeng, Ju Youlun

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

Received date: 2004-05-14

Abstract A continuous wave diode-pumped Tm, Ho:GdVO₄ laser operating at cryogenic temperature is reported. Tm, Ho : GdVO₄ crystal has much stronger and broader absorption spectrum than Tm- Ho-codoped YLF and YAG, and is very favorable for diode pumping. Radiation from a fiber coupled diode (core diameter 0.4 mm, N. A. 0.3) is coupled into Tm(5% at.), Ho(0.5% at.) : GdVO₄ crystal by a pair of achromatic lens for end pumping. Output power of 3.6 W at 2.048 μm is obtained under pump power of 14 W and emission wavelength of 794 nm. The optical-optical conversion efficiency is 25.7% and slope efficiency is 26.6%. Corresponding to the absorbed pumping power, the optical-optical conversion efficiency is up to 35%. Due to cross relaxation between Tm³⁺ ions, pumping quantum efficiency of 1.3 is achieved.

Keywords Fiber-coupled diode; Tm, Ho : GdVO₄ crystal



Yao Baoquan was born in Liaoning province, China, in June, 1970. He received doctoral degree in physical electronics from Harbin Institute of Technology, China, in 2002. Since 1996, he has been an associate professor in the National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology. His research interest is the design of Mid-IR optical parametric oscillator and thulium- and holmium-doped solid state laser.