

适合 LD 泵浦的 $Tm \cdot YAG$ 的研究

张秀荣 张新民 吴光照

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 研究了 $Tm \cdot YAG$ 激光晶体的光谱特性,重点分析了适合 LD 泵浦的优越性和 $Tm \cdot YAG$ 中 OH 根对激光性能的影响。

关键词 光谱特性, LD 泵浦, OH 根

1 引 言

$Tm \cdot YAG$ 激光晶体已经实现了 $2.02 \mu m$ 的激光输出,此波长对人眼安全,大气中传输性能好,适合于微粒探测、医学和激光雷达^[1]等方面的应用。 $Tm \cdot YAG$ 激光晶体是相干激光雷达的理想材料,引起人们浓厚的兴趣。但至今还不能广泛应用,原因很多,例如 $Tm \cdot YAG$ 中存在 OH 根等,还须进行更深入的研究。 $Tm \cdot YAG$ 单晶的特点是掺杂浓度高(12at.-%),荧光寿命长($11 ms^{[1]}$),吸收谱线宽($\Delta\lambda = 4 nm$),吸收峰值波长为 $785 nm$,适合 LD 泵浦。此晶体的有效发射截面 $\sigma = 2 \times 10^{-21} cm^2$ (300 K),发射谱连续可调范围为 $1.87 \sim 2.16 \mu m$ 。

用提拉法生长了 $Tm \cdot YAG$ 单晶,掺杂浓度为 3at.-%,测量了光谱特性(荧光、吸收谱、荧光寿命),分析了适合 LD 泵浦的可能性,重点分析了 $Tm \cdot YAG$ 中 OH 根对激光特性的影响。

2 实 验

2.1 $Tm \cdot YAG$ 的吸收谱

我们用 Lambda-9 型 UV/VIS/NIR 分光光度计测量了室温下 $Tm \cdot YAG$ 的吸收谱,如图 1 所示。其吸收谱线比较宽。图 2 给出了室温下 $Tm \cdot YAG$ 的部分吸收谱($^3H_6 \rightarrow ^3H_4$)和 $Nd \cdot YAG$ 的部分吸收谱($^4I_{9/2} \rightarrow ^4F_{3/2}$)。比较两者的吸收谱,明显地看到, $Tm \cdot YAG$ 吸收谱的中心波长为 $780 nm$,带宽为 $4 nm$,吸收系数为 $0.5 cm^{-1}$,而 $Nd \cdot YAG$ 吸收谱的中心波长为 $810 nm$,带宽为 $1 nm$,所以, $Tm \cdot YAG$ 比 $Nd \cdot YAG$ 单晶更适合用 LD 泵浦。

2.2 荧光谱及荧光寿命

用自制的可见近红外荧光谱仪,测量了室温下 $Tm \cdot YAG$ 单晶的荧光谱,如图 3 所示。 Tm^{3+} 离子在 YAG 中,上能级 3F_4 分裂成 9 个 Stark 能级,最低能级 3H_6 分裂成 13 个 Stark 能级,荧光总带宽 $400 nm$,单独一个 Stark 跃迁线宽为 $10 nm$,允许跃迁能级数为 117 个^[2]。图 4 给出了 $Tm \cdot YAG$ 的能级图。

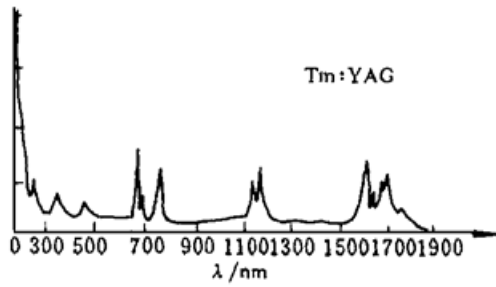


图 1 室温下 Tm·YAG 的吸收谱
Fig. 1 The absorption spectrum of Tm ions in YAG, 300 K

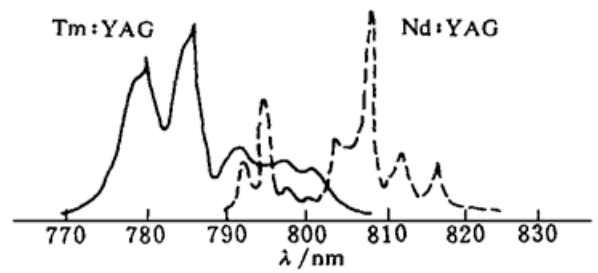


图 2 室温下 Tm·YAG 的部分吸收谱
Fig. 2 The part absorption spectra of Tm and Nd ions in YAG, 300 K

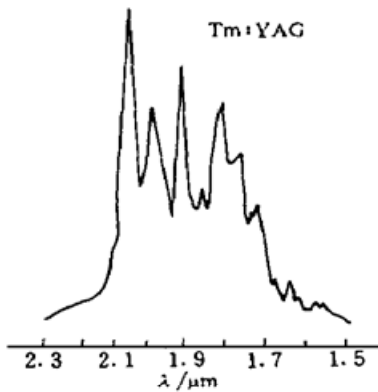


图 3 室温下 Tm·YAG 的荧光谱
Fig. 3 The fluorescence spectrum of Tm ions in YAG crystal (300 K)

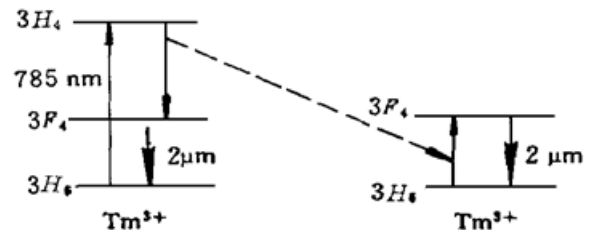


图 4 室温下 Tm·YAG 的部分能级图
Fig. 4 The part level scheme of Tm ions in YAG crystal (300 K)

当用钛宝石激光(785 nm)泵浦 Tm·YAG 时, Tm 离子从 3H_6 跃迁到 3H_4 和 3F_4 能级。通过猝灭过程, 跃迁到 3F_4 , 由 3F_4 跃迁到 3H_6 , 发出荧光。发光范围为 $1.6 \sim 2.3 \mu\text{m}$, 峰值波长为 $2.05 \mu\text{m}$, 掺杂浓度为 $4\text{at.}\%$, 荧光寿命为 11 ms , 发射截面 $\sigma = 2.0 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$, 量子效率为 2。用波长为 785 nm 的 LD 泵浦时, 斜率效率为 56% ^[2]。

值得注意的是, 入射泵浦能量强度的大小直接影响荧光寿命, 比如对于掺杂 $4\text{at.}\%$ 的 Tm·YAG 激光棒, 当泵浦功率为 10 kW/cm^2 时, 测量其有效荧光寿命为 1.8 ms 。当泵浦功率强度减少 $4/5$ 时, 测量其有效荧光寿命为 3 ms , 而且, 当用 LD 泵浦时, 为了降低激光阈值, 必须降低激光棒的温度, 在温度范围 $-40 \sim 16^\circ\text{C}$ 之间测量其激光阈值, 因此此晶体棒必须安装在热电冷却器上^[1]。我们利用衰减法测得荧光寿命为 3.1 ms , 掺杂浓度为 $3\text{at.}\%$ 。

2.3 适合 LD 泵浦的分析

LD 泵浦的固体激光器要求激光材料高储能, 即荧光寿命长、浓度高; 晶体体积小、吸收波长宽; 泵浦效率高, 激光晶体质量要好。Tm·YAG 的掺杂浓度高 ($12\text{at.}\%$), 荧光寿命长 (11 ms), 吸收峰值波长为 785 nm , 带宽为 4 nm , 量子效率为 2。因此, 非常适合用 LD 泵浦。Paul J. M. 等人用一个 3 W 的 LD 泵浦 Tm·YAG, 获得了 CW 输出功率为 0.5 W , 波长为 $2.02 \mu\text{m}$, Q 开关脉冲输出能量超过 1 mJ/脉冲 , 重复频率为 100 Hz , 转换效率为 0.35 MJ/W ^[1]。

2.4 Tm·YAG 晶体中 OH 根的影响

用红外吸收谱仪测量了 Tm·YAG 在 $400 \sim 2000 \text{ cm}^{-1}$ 范围的红外吸收谱, 如图 5 所示。样品厚度为 63 mm , 浓度为 $4\text{at.}\%$ 。吸收范围在 $3360 \sim 3850 \text{ cm}^{-1}$ 之间, 峰值波长为 3370 cm^{-1} ,

是 OH 根吸收峰, $\Delta\lambda = 30 \text{ cm}^{-1}$, 峰值吸收系数 $\alpha = 0.256 \text{ cm}^{-1}$, H^+ 离子密度为 10^{20} cm^{-3} , Tm:YAG 中 OH 浓度为 $1.26 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 这对 Tm:YAG 的激光特性影响很大。

首先, 由于 OH 根的存在增加了无辐射跃迁, 因为 Tm:YAG 的能隙很大, $\Delta E = 4950 \text{ cm}^{-1}$, 需要 1.47 个 OH 振动离子相匹配。猝灭几率也很大, OH 离子跃迁几率 (W_{OH}) 和声子级数 (N) 之比为 4.25。一般情况下, 当声子级数 $N = 1$ 时, 无辐射跃迁几率 $W \ll 1$, 当 YAG 中的 W_{OH} 为 0.5 时, $W_{\text{OH}}/W = 6 \times 10^{-5}$ 。即由于 OH 的存在, 使得相邻的 Tm 离子的无辐射跃迁几率增加了 5000 倍, 显然对激光输出危害很大。

其次, OH 根的存在容易使 YAG 产生色心。YAG 中, 高光学密度、具有宽吸收带的色心是由于氧空位形成的, 而氧空位依赖于 OH 根, 受到 H^+ 粒子的影响。YAG 中有 10^{17} cm^{-3} 的 H 原子团持续干扰了晶格。光谱中强的吸收峰和线宽证明, 在氧格位上形成很强的 H 原子团, 尤其是在八面体格位上干扰更大。通过电子顺磁共振光谱和定位光谱的研究^[3], 发现 YAG 晶体中, 由于 OH 根的干扰, 存在 5 个非等价的 Nd^{3+} 格位, 其中 4 个 Nd^{3+} 格位受到 OH 根扰动, 格位能级平均下降 8 cm^{-1} , 最低受扰动的 Nd^{3+} 与未受扰动的 Nd^{3+} 能级之间相差 20 cm^{-1} , 而且由于 4 个受到扰动的 Nd^{3+} 与邻近的 OH 根之间有效耦合, 使得低能级与基态之间的无辐射跃迁几率大大增加, 严重影响激光输出特性。

对于适合于激光雷达和医学上应用的 Tm:YAG 激光, 必须注意晶体中 OH 根的处理问题, 才能提高 Tm:YAG 激光的应用效果。实验证明, 晶体中的 H 杂质, 可以通过改进生长工艺来消除, 首先烘干原料, 其次, 在氮气气氛中生长, 然后, 将晶体在 $\text{I}_2 + \text{O}_2$ 气氛下退火处理。

参 考 文 献

- 1 Paul J. M. Suni, Sammy W. Henderson. 1-mJ/pulse Tm:YAG laser pumped by a 3-W diode laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(11): 817~819
- 2 R. C. Stoneman, L. Esterowitz. Efficient, broadly tunable, laser-pumped Tm:YAG and Tm:YSGG CW laser. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(9): 486~488
- 3 D. L. Dexter. Two ideas on energy transfer phenomena: ion-pair effects involving the OH stretching mode, and sensitization of photovoltaic cells. *Journal of Luminescence*, 1979, **18/19**(part 2): 779~784

Study of Tm:YAG Crystal Suitable for LD Pumping

Zhang Xiurong Zhang Xinmin Wu Guangzhao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract In this paper, the study of spectral properties of a Tm:YAG crystal and the analysis of the advantages of suitable LD pumping in Tm:YAG crystal were reported. The effects of OH^{-1} in Tm:YAG on laser properties were also analysed.

Key words spectral properties, LD pumping, OH^{-1}

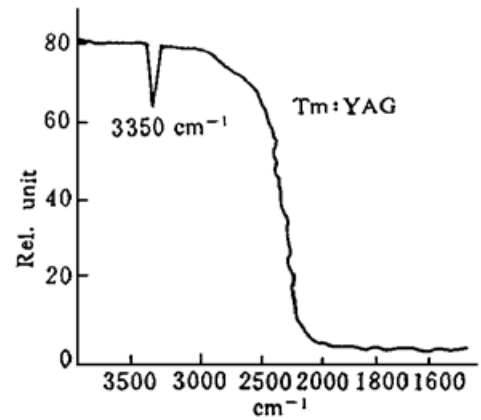


图 5 室温下 Tm:YAG 的红外吸收谱
Fig. 5 The infrared absorption spectrum of Tm:YAG (300 K)