

激光雷达用 2 μm Tm:YAG 激光器波长精细调控的理论研究

王彩丽, 谢仕永, 刘 辉, 许阳蕾, 张 敬

(中国建筑材料科学研究总院, 北京 100024)

摘 要: 2 μm 激光应用于激光雷达探测等领域, 对于波长的要求比较精确, 研究了激光器结构参数对准三能级 Tm:YAG 激光器输出波长的精细调控技术。基于侧面泵浦激光器泵浦阈值的理论模型, 通过对不同谱线的泵浦阈值进行数值模拟, 研究结果表明: 通过改变晶体温度、激光介质长度、输出耦合率等途径可实现激光器的输出波长在 2.0~2.1 μm 的光谱区内的精细调控。

关键词: 激光器; 准三能级; 泵浦功率密度; 波长精细调控

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0830003

Theoretical study of 2 μm Tm:YAG laser with wavelength switchable accurately for lidar

Wang Caili, Xie Shiyong, Liu Hui, Xu Yanglei, Zhang Jing

(China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

Abstract: Application of 2 μm laser in lidar systems, remote sensing, requires more accurate wavelength. Based on the analysis of the quasi-three-level side pumped Tm:YAG laser system, the oscillating conditions of this laser were predicted from the point of pump threshold with taking into account reabsorption loss. The model accurately predicts that the laser central wavelength is switchable in the range of 2.0 -2.1 μm by means of different laser parameters, such as crystal temperature, the crystal length, the transmission of the output coupler.

Key words: laser; quasi-three-level; pump power density; wavelength switchable accurately

收稿日期: 2018-03-11; 修订日期: 2018-04-15

基金项目: 中国建筑材料科学研究总院前沿探索基金(YX-91)

作者简介: 王彩丽(1983-), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事固体激光技术方面的研究。Email: clw3662@163.com

0 引言

2 μm 激光这种波段的激光具有被水强吸收、对人眼安全、可用石英光纤传输、通过大气透过率高等特性。广泛的应用于人眼安全激光雷达、激光测距、激光遥感、激光成像、医学诊断和治疗、科学研究、材料处理、光学信号处理、数据处理、环境监测等领域^[1-4]。其中激光雷达重要的研究方向是基于 2 μm 激光器的差分吸收雷达。相比 10.6 μm 的激光,大气对 2 μm 激光的吸收较小,对雨、雾的穿透能力更强,激光线宽更窄,比 CO₂ 激光雷达的测量精度要高出 1 个数量级^[5],因此可以成为良好的激光雷达光源。

通过分析各种激光介质的吸收谱、发射谱及能级结构,发现 Tm:YAG 晶体具有荧光寿命长、吸收谱线宽和基质硬度高等特点,其晶体谱线吸收峰与市售成熟高功率 785 nm 或 808 nm LD 相匹配^[6]。YAG 的立方结构使其具有较窄的荧光谱线,有利于实现高强度泵浦条件下高增益、低阈值 2 μm 激光输出,因此 Tm:YAG 激光晶体是目前最常用的 2 μm 激光晶体^[7-8]。

通过分析 Tm:YAG 晶体荧光谱,激光器的调谐范围是 0.87~2.16 μm。在 Tm:YAG 激光器 2 μm 激光应用过程中发现,某些领域对于波长的要求比较精确,例如激光雷达探测、作为中远红外激光系统的泵浦源等方面,要求该波长在大气中具有较好的透过率,且在中远红外激光系统中,能够避开 GaAs 吸收带,减少 GaAs 等 OPO 晶体泵浦时的吸收损耗。在波长范围 2.0~2.1 μm 内,2.1 μm 比 2.0 μm 激光具有优势:2.1 μm 激光在大气中具有较好的透过率,可以避开 GaAs 吸收带,减少 GaAs 等 OPO 晶体泵浦时吸收损耗,更适合作为中远红外光(3.0~12.0 μm)激光系统的泵浦源^[9-10]。因此实现 Tm:YAG 激光器输出波长的精细调控在激光雷达、激光传感和光电对抗等领域有重要的应用价值。

由于 Tm:YAG 激光器最大发射截面位于 2.0 μm 附近,因此输出波长通常在 2.01 μm、2.02 μm,已有很多相关报道,已实现超过 100 W 的连续波和脉冲运转激光输出。E. C. Honea 等人报道了 LD 端面泵浦 2.01 μm Tm:YAG 激光器,最大输出功率达到 115 W^[11]。K.S. Lai 等人利用 -10℃ 的水和甘油的混合物作为冷却剂,采用侧面泵浦棒状 Tm:YAG 激光晶体方式,获得了 150 W 的连续波 2.02 μm 激光输出^[12]。

D. Cao 等采用 LD 侧面泵浦掺杂浓度为 3.5 at.% 的 Tm:YAG 晶体,在晶体冷却温度 8℃ 的条件下,输出波长为 2.02 μm,最大功率达到 200 W^[13]。

通常采用在激光谐振腔内插入光学元件或者具有选择性介质膜的反射镜等方式来对 Tm:YAG 激光器进行波长调控,R. C. Stoneman 等人采用在激光谐振腔内插入双折射晶体,实现 Tm:YAG 激光器的波长调谐^[14]。由于腔内插入过多元件会增加功率的损耗,而且增大了调整难度,不利于产生高功率的激光输出。笔者报道的波长可调谐的高功率 LD 侧面泵浦棒状 Tm:YAG 激光器,通过改变输出耦合率实现 Tm:YAG 激光器波长在 2.02 μm 与 2.07 μm 调控,并且 2.07 μm 波长的输出功率达到 115 W^[15]。后来,报道了高功率的 LD 侧面泵浦 2.07 μm Tm:YAG 激光器,在晶体冷却温度 8℃ 的条件下输出功率达到 267 W^[16]。报道通过输出镜耦合率实现对侧面泵浦 Tm:YAG 激光器输出波长在 2.02 μm 与 2.07 μm 调控的理论及实验研究^[17]。

文中考虑准三能级系统的重吸收损耗,基于侧面泵浦激光器阈值理论模型,对不同谱线的泵浦阈值进行数值模拟,对实现 Tm:YAG 激光器的输出波长精细调控进行可行性分析。分析和讨论晶体温度对 Stark 分裂精细能级布局数、泵浦阈值的影响规律,探究激光器的结构设计参数对不同谱线跃迁的影响规律,通过激光器结构设计实现 Tm:YAG 激光器波长在 2.0~2.1 μm 的光谱区内的精细调控。

1 Tm:YAG 激光器波长精细调控的理论分析

Tm:YAG 激光器准三能级激光系统,Tm³⁺离子上下能级为重态 Stark 能级,从 ³F₄ 最低能级(5 556 cm⁻¹)受激辐射到 ³H₆ 位于 765、730、690、610 cm⁻¹ Stark 能级分别产生 2.09、2.07、2.05、2.02 μm 波长的激光,具体如图 1 所示。

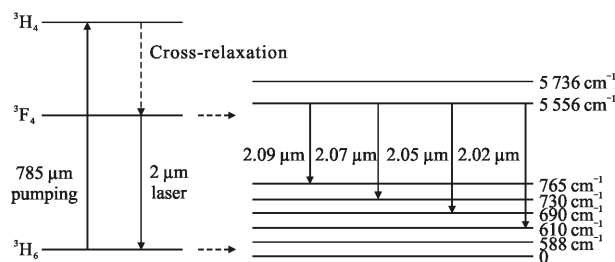


图 1 Tm:YAG 激光器能级分布

Fig.1 Energy level distribution of the Tm:YAG laser

基于侧面泵浦准三能级激光器系统,不同谱线跃迁的泵浦功率密度阈值为^[18-20]:

$$P_{th_density,i} = \frac{h\nu_p(L_i + T_i + 2N_{a,i}^0 \sigma_l)}{2\tau_i \eta_i \sigma_i (f_{a,i} + f_b)} \quad (1)$$

式中: $h\nu_p$ 为泵浦光子功率; L_i 为谐振腔固有损耗; T_i 为输出镜耦合率; $f_{a,i}$ 为激光下能级粒子数占 3H_6 多重态粒子总数的分数; f_b 为激光上能级粒子数占 3F_4 多重态粒子总数的分数; σ_l 为激光的受激发射截面; τ_i 为 3F_4 能级的荧光寿命; $N_{a,i}^0$ 为激光下能级的粒子数密度; l 为激光介质长度; η_i 为上能态的效率,表示激光跃迁时发射的功率与吸收的泵浦功率之比,其表达式为 $\eta_i = \eta_{p,i} \times \eta_{s,i}$, $\eta_{p,i}$ 为泵浦量子效率, $\eta_{s,i}$ 为斯托克斯因子,假设 $2.02 \mu\text{m}$ 振荡模式为 $i=1$, $2.05 \mu\text{m}$ 振荡模式为 $i=2$, $2.07 \mu\text{m}$ 振荡模式为 $i=3$, $2.09 \mu\text{m}$ 振荡模式为 $i=4$ 。

对于给定的谐振腔结构,只要精确测量或计算出激光上下能级布局数分布、激光下能级粒子数、发射截面、激光上能态效率,可以计算出发生振荡波长转换的条件。

2 Tm:YAG 激光器波长精细调控的数值模拟

通过理论分析可知,激光器中的损耗项主要包括谐振腔的固有损耗、输出耦合损耗、重吸收损耗,重吸收损耗主要受到激光下能级粒子数、吸收截面、激光介质长度的影响,而激光下能级粒子数由基态粒子数和温度决定。因此,主要分析温度、吸收截面、激光介质长度、输出耦合率等因素对激光谱线选择的影响。对于 3.5% 掺杂的 Tm:YAG 激光器的基本数据,其他计算参数如下: $N_{Tm} = 4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $\lambda_p = 785 \text{ nm}$, $\tau = 11 \text{ ms}$, $\eta_1 = 38.9\%$, $\eta_2 = 38.3\%$, $\eta_3 = 37.9\%$, $\eta_4 = 37.6\%$, $\sigma_{2.02 \mu\text{m}} = 2 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$, $\sigma_{2.05 \mu\text{m}} = 0.97 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$, $\sigma_{2.07 \mu\text{m}} = 0.72 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$, $\sigma_{2.09 \mu\text{m}} = 0.48 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。

2.1 温度对激光跃迁能级的影响

同一个多重态斯塔克能级间的无辐射弛豫速率远大于相邻多重态之间的跃迁速率,则在稳态泵浦时,各多重态斯塔克能级上的粒子数遵守玻耳兹曼分布,即:

$$N_a = \frac{g_a N_0}{Z_a} \exp(-E_a/kT) = f_a N_0 \quad (2)$$

$$N_b = \frac{g_b N_1}{Z_b} \exp(-E_b/kT) = f_b N_1 \quad (3)$$

其中

$$Z_a = \sum_i g_i \exp(-E_i/kT) \quad (4)$$

$$Z_b = \sum_j g_j \exp(-E_j/kT) \quad (5)$$

式中: Z_a, Z_b 为 3H_6 和 3F_4 的配分函数; g_i, g_j 为上下多重态斯塔克能级的简并度; E_i, E_j 为上下多重态中第 i, j 个斯塔克能级距最低斯塔克能级的距离; N_0 和 N_1 为 3H_6 和 3F_4 态的粒子总数; f_a 和 f_b 为能级 a, b 上的粒子数占 3H_6 和 3F_4 多重态粒子总数的分数。

当输出耦合率为 5%、激光介质长度为 138 mm,激光上下能级的布局数、泵浦功率密度随着温度的变化曲线如图 2、3 所示。

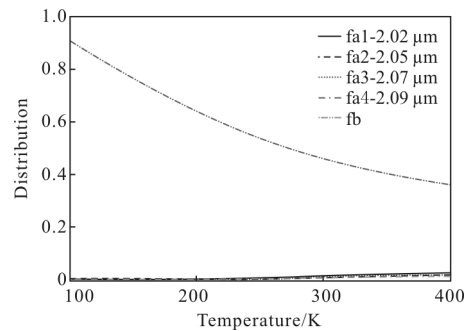


图 2 激光上下能级布局数与温度的关系曲线

Fig.2 Distribution on the lower and upper laser level as a function of temperature

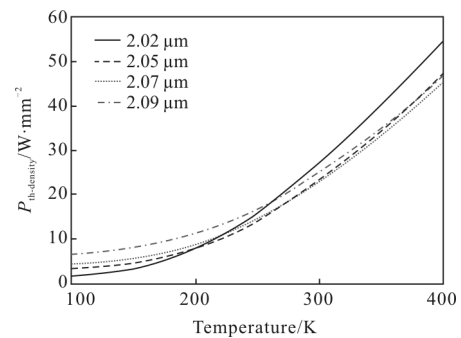


图 3 泵浦阈值与温度的关系曲线

Fig.3 Pump threshold as a function of temperature

从图 2、3 可以看出:激光上能级的布局数分布随着温度的升高而逐渐降低,激光下能级的布局数分布随着温度的升高而逐渐降低,激光下能级的布局数分布远远小于激光上能级,因此,达到阈值时,可以认为基态上的粒子总数基本保持不变。

不同谱线的泵浦阈值随着温度的升高而逐渐增

加。当温度处于 100~201 K 范围内, 2.02 μm 的阈值处于最低, 在温度处于 201~267 K 范围内, 2.05 μm 的阈值处于最低, 而当温度高于 265 K 时 2.07 μm 的阈值处于最低。

2.2 激光介质长度对激光跃迁能级的影响

假设不考虑激光谐振腔的固有损耗, 当输出镜耦合率固定为 5%、晶体温度为 281 K 时, 分别计算了在不同激光介质长度时, 2.02、2.05、2.07、2.09 μm 波长的吸收泵浦功率密度阈值, 如图 4 所示。

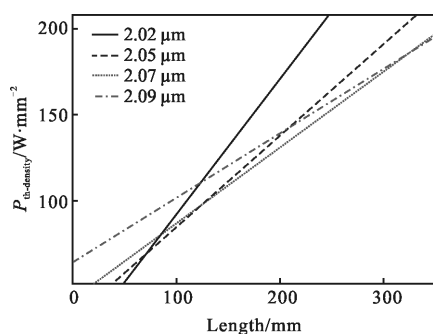


图 4 吸收泵浦功率密度阈值与晶体长度关系曲线

Fig.4 Absorbed pump power density threshold as a function of crystal length

从图 4 中可以看出: 当激光介质长度低于 59 mm 时, 2.02 μm 谱线的阈值最低, 在谱线竞争中会优先起振, 此时 Tm:YAG 激光器的输出波长为 2.02 μm 。当激光介质长度处于 59~124 mm 时, 2.05 μm 谱线会优先起振, 当激光介质长度处于 124~329 mm 时, 2.07 μm 谱线会优先起振, 激光介质长度大于 329 mm 时, 2.09 μm 谱线会优先起振。实际情况下, 激光谐振腔内存在固有损耗, 激光器输出波长发生跃变对应的激光介质长度略大于计算值。

2.3 输出耦合率对激光跃迁能级的影响

假设不考虑激光谐振腔的固有损耗, 当激光介质长度固定为 138 mm、晶体温度为 281 K 时, 2.02、2.05、2.07、2.09 μm 波长的吸收泵浦功率密度阈值随着输出耦合率的变化曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出: 当输出耦合率小于 2.1%, 2.09 μm 谱线优先起振, 当输出耦合率在 2.1%~5.7% 范围内, 2.07 μm 谱线会优先起振; 当输出耦合率在 5.7%~10.5% 范围内, 2.05 μm 谱线会优先起振; 当输出耦合率在大于 10.5%, 2.02 μm 谱线优先起振。激光谐振腔内存在固有损耗, 波长发生跃变时对应的

输出耦合率小于计算值。

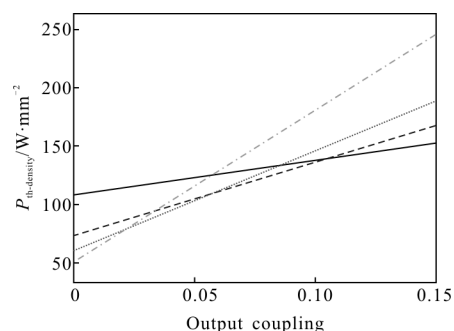


图 5 吸收的泵浦功率密度阈值和输出耦合率的关系曲线

Fig.5 Absorbed pump power density threshold as a function of output coupler

3 结果分析

激光器腔内并未插入任何波长调谐元件, 通过提高晶体温度、减小输出耦合率或增加激光介质长度使 Tm:YAG 激光器输出波长发生红移, 在 2.0~2.1 μm 的光谱区实现波长的精细调控。原因是 Tm:YAG 准三能级系统中存在重吸收损耗。

提高晶体温度、减小输出耦合率或增加激光介质长度时, 在总损耗中重吸收损耗项占据的比重较大, 因此重吸收损耗项对泵浦功率密度阈值起决定作用。同时, $^3\text{H}_6$ 能级中的较低斯塔克能级热粒子数远大于 $^3\text{H}_6$ 能级中较高斯塔克能级热粒子数, 此时激光下能级位于较高斯塔克能级的激光发射具有更低的阈值, 激光首先在激光上能级与 $^3\text{H}_6$ 能级中的较高斯塔克能级之间形成, 从而使 Tm:YAG 激光器输出波长为 2.0~2.1 μm 的光谱区内长波长。

降低晶体温度、增大输出耦合率或减小激光介质长度时, 重吸收损耗项占据总损耗比重较小, 因而重吸收损耗项对泵浦功率密度阈值的影响较小, 发射截面对泵浦功率密度阈值起决定作用, 在 2.0~2.1 μm 的光谱区, 随波长的红移, 对应的发射截面逐渐减少, 此时下能级位于较低斯塔克能级的激光发射具有更低的阈值, 在激光上能级与 $^3\text{H}_6$ 能级中的较低斯塔克能级之间形成; 从而使 Tm:YAG 激光器输出波长为 2.0~2.1 μm 的光谱区内短波长。

参考文献:

[1] Yu J, Trieu B C, Modlin E A, et al. 1 J /pulse Q-switched

- 2 μm solid-state laser[J]. *Optical Letter*, 2006, 31(4): 462-464.
- [2] Suni P J M, Henderson S W. 1 μm /pulse Tm:YAG laser pumped by a 3-W diode laser [J]. *Optical Letter*, 1991, 16(11): 817-819.
- [3] Yokozawa T, Hara H. Laser-diode end-pumped Tm:YAG eye-safe laser[J]. *Optical Letter*, 1996, 9(35): 1424-1426.
- [4] Lia L J, Yao B Q, Ju Y L, et al. 8.30 μm singly resonant ZnGeP₂ optical parametric oscillators pumped by a Tm, Ho:GdVO₄ laser[J]. *Laser Physics*, 2000, 19(10): 1957-1959.
- [5] Li Yufeng. Study of diode pumped Tm³⁺ doped solid state lasers [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
李玉峰. 二极管泵浦单掺 Tm³⁺ 固体激光器研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [6] Sato A, Asai K, Itabe T. Double-pass-pumped Tm:YAG laser with a simple cavity configuration [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(27): 6395-6400.
- [7] Buryy O A, Sugak D Y, Ubizskii S B, et al. The comparative analysis and optimization of the free-running Tm³⁺:YAP and Tm³⁺:YAG micro lasers [J]. *Appl Phys B*, 2007, 88: 433-442.
- [8] Ju Y L, Wang Q, Wu C T, et al. Lasing characteristics of a single-frequency Tm:YAG laser [J]. *Laser Phys*, 2009, 19(6): 1216-1219.
- [9] Petrov V, Tanaka Y, Suzuki T. Parametric h generation of 1-ps pulses between 5 and 11 μm with a ZnGeP₂ crystal [J]. *J Quantum Electron*, 1997, 33: 1749-1755.
- [10] Nieuwenhuis A F, Lee C J, van der Slot P J M, et al. Mid-infrared ZGP optical parametric oscillator directly pumped by a lamp-pumped, Q-switched Cr,Tm,Ho:YAG laser [C]// SPIE, 2007, 6455: 645518.
- [11] Honea E C, Beach R J, Sutton S B, et al. 115-W Tm:YAG diode-pumped solid-state laser [J]. *J Quantum Electron*, 1997, 33: 1592-1600.
- [12] Lai K S, Xie W J, Wu R F, et al. A 150 W 2-micron diode-pumped Tm:YAG laser [C]//Conference on Advanced Solid-state Lasers, 2002, 68: 535-539.
- [13] Cao D, Peng Q, Du S, et al. A 200 W diode-side-pumped CW 2 μm Tm:YAG laser with water cooling at 8°[J]. *Appl Phys B*, 2011, 103: 83-88.
- [14] Stoneman R C, Esterowitz L. Efficient, broadly tunable, laser-pumped Tm:YAG and Tm:YSGG cw lasers [J]. *Opt Lett*, 1990, 15: 486-488.
- [15] Wang C L, Du S F, Niu Y X, et al. Wavelength switchable high-power diode-side-pumped rod Tm:YAG laser around 2 μm [J]. *Opt Exp*, 2013, 21: 7156-7161.
- [16] Wang C L, Niu Y X, Du S F, et al. High-power diode-side-pumped rod Tm:YAG laser at 2.07 μm [J]. *Appl Opt*, 2013, 52: 7494-7497.
- [17] Niu Y X, Wang C L, Liu W W, et al. Theoretical model predictions and experimental results for a wavelength switchable Tm:YAG laser [J]. *Appl Opt*, 2014, 53: 4359-4362.
- [18] Taira T, Tulloch W M, Byer R L. Modeling of quasi-three-level lasers and operation of cw Yb:YAG lasers [J]. *Appl Opt*, 1997, 36: 1867-1874.
- [19] Fan T Y, Byer R L. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser[J]. *J Quantum Electron*, 1987, 23: 605-612.
- [20] Man Da, Niu Yanxiong, Wang Caili. Theoretical analysis and numerical simulation for wavelength switchable Tm:YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0114001. (in Chinese)
满达, 牛燕雄, 王彩丽. Tm:YAG 激光器的波长可调谐理论和实验研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0114001.