

·测试、试验与仿真·

Tm:YAP板条激光器的数值分析

丁宇, 闫秀生

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘要:建立了在双端泵浦Tm:YAP板条晶体条件下激光能级跃迁的准三能级速率方程模型。通过对准三能级速率方程进行求解,数值仿真了晶体温度分布、上转换效应、泵浦光斑尺寸以及输出镜透过率等参数对Tm:YAP板条激光器输出功率的影响,为高功率Tm:YAP板条激光器的设计提供必要的数值分析基础。

关键词:速率方程;Tm:YAP;上转换效应

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-01-0041-05

The Numerical Analysis of Tm:YAP Slab Laser

DING Yu, YAN Xiu-sheng

(Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China)

Abstract: The quasi-three energy levels laser rate equation model of Tm:YAP slab pumped by two fiber coupled diode lasers is developed. Based on the solution of the equation, the influence on Tm:YAP laser output power is simulated, including the working temperature distribution of the crystal, up-conversion effect, the appropriate range of the spot radius and the transmission efficiency of output lens. It provides the necessary numerical analysis basis of designing the high power Tm:YAP slab laser.

Key words: rate equation; Tm:YAP; up-conversion effect

室温条件下的 $2\ \mu\text{m}$ 波段的激光,在激光雷达、遥感、医学、材料加工等领域具有广泛的应用前景。在激光雷达方面,与长波 CO_2 激光器相比, $2\ \mu\text{m}$ 激光具有大气消光比低的优点;与近红外 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光器相比, $2\ \mu\text{m}$ 激光利于被人眼玻璃体吸收,对人眼更为安全^[1]。在遥感探测方面, $2\ \mu\text{m}$ 波段处于很多大气分子的吸收峰(如 H_2O , CO_2 等),因而可以广泛应用于大气探测系统,对气态大气成分和有害气体含量持续监测,以实现大气污染的实时控制^[2-3]。在医学方面, $2\ \mu\text{m}$ 激光在生物组织穿透能力较小,进行高精度手术时对其余组织损害较小,并且手术过程中出血较少,伤口易于凝固,因此, $2\ \mu\text{m}$ 激光是医疗领域的理想光源,具有简单方便、手术创面小、术后交叉感染小、易愈合等特点,在手术切除、牙齿治疗、碎石、关节内窥镜检查等方面具有重要的应用^[4-5]。在

材料加工方面,通常激光加工过程需要加工材料对激光具有较大的吸收,但是增加添加剂的过程使得制造过程工艺复杂,提高材料加工成本,并且在某些特殊领域,如医疗、生物领域,不允许额外加入添加剂,以避免添加剂对生物体的损害,而 $2\ \mu\text{m}$ 激光在塑料材料中有较高的吸收,可以方便的对塑料材料进行切割、熔接和标记。目前高输出功率的 $2\ \mu\text{m}$ 激光在生物或者医学透明生物射流芯片加工制造中已经被广泛应用^[6-7]。

目前,作为可输出 $2\ \mu\text{m}$ 波长掺Tm的基质材料主要集中于YAP、YAG和YLF三种基质,其中由于YAP基质不仅具有各项异性的特性,而且还具有抑制较强的热致双折射,损伤阈值较高和稳定性较好等优点,使得以掺Tm的YAP晶体为工作物质的 $2\ \mu\text{m}$ 激光器在高功率激光输出的研究方面取得了很多进展。文中建立了在双端泵浦Tm:YAP板条

晶体条件下激光能级跃迁的准三能级速率方程模型,通过对准三能级速率方程进行求解,数值仿真了晶体温度分布、上转换效应、泵浦光斑尺寸以及输出镜透过率等参数对Tm:YAP板条激光器输出功率的影响,为高功率Tm:YAP板条激光器的设计提供必要的数值分析基础。

1 Tm:YAP晶体的光学特性

1.1 Tm:YAP晶体的吸收与发射光谱

激光晶体的吸收光谱和发射光谱对激光器泵浦源的选择和激光器本身输出波长都有重要影响。Tm:YAP晶体为各向异性晶体,在不同轴向的发射和吸收截面具有较大差异,其有效吸收谱带位于790 nm附近,对应 ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_4$ 的能带跃迁。图1为Tm:YAP晶体在790 nm附近的偏振状态下的有效吸收截面和受激发射截面。

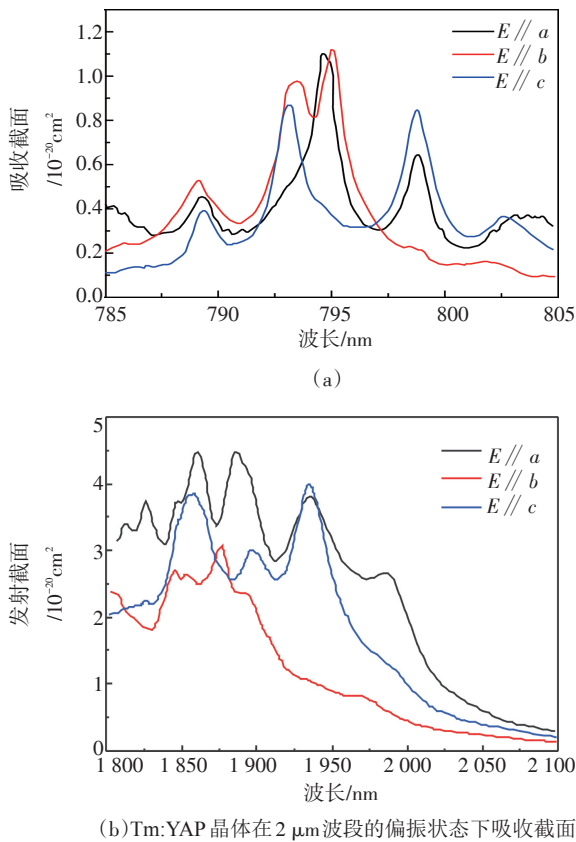


图1 Tm:YAP晶体的不同偏振状态下吸收截面和受激发射截面

有效吸收截面 $\sigma_{\text{abs}}(\text{cm}^2)$ 与吸收系数 $\alpha(\text{cm}^{-1})$ 的关系为

$$\sigma_{\text{abs}}(\lambda) = \frac{\alpha(\lambda)}{N_{\text{Tm}}} \quad (1)$$

其中, N_{Tm} 为单位体积内掺Tm $^{3+}$ 总数。

由图1a可知,对于 $E//a$,主要吸收峰位于794.8 nm附近,吸收截面约为 $1.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$;对于 $E//b$,主要吸收峰位于795.1 nm附近,吸收截面也约为 $1.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$;当 $E//c$ 时,在795 nm并无明显吸收峰,仅在789.2 nm和798.9 nm处有较小的吸收峰。通过对Tm:YAP晶体吸收光谱进行分析,发现 $E//a$ 和 $E//b$ 在795 nm附近具有较大的吸收截面,并且具有较大的半宽度,约为4~5 nm($E//b$),非常适合激光二极管泵浦。

Tm:YAP晶体在2 μm 波段的偏振发射截面如图1b所示。对于 $E//a$ 偏振,Tm:YAP晶体在1.98 μm 和1.94 μm 的有效发射截面分别为 $3.8 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 和 $2.6 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$;对于 $E//c$ 偏振Tm:YAP晶体在1.94 μm 有效发射截面为 $3.98 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$;b轴方向的有效发射截面明显小于其他两轴方向的发射截面。根据发射谱,可以通过选择不同轴向切割的晶体来获得不同波长的激光输出。对于c轴切割的晶体(通光轴为c轴),由于 $E//a$ 的发射截面均大于 $E//b$,其输出波长一般为 $E//a$ 偏振。同理对a轴切割的晶体,其输出波长的偏振方向一般为 $E//c$ 。

1.2 Tm:YAP晶体的能级结构

常温运行的Tm:YAP板条激光器属于准三能级激光系统,与三能级和四能级激光系统相比,具有激光下能级位于稀土激活离子基态的Stark能级上的特点。激光离子掺杂在不同基质内会造成Stark能级分裂的差异,而Stark能级分裂决定着激光能级跃迁的玻尔兹曼分布因子,进而影响输出波长。图2为Tm:YAP包含Stark能级分裂的能级跃迁图。

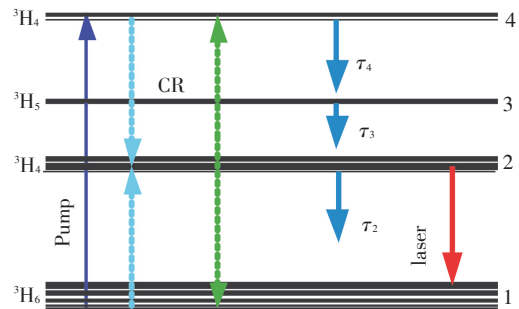


图2 Tm:YAP激光跃迁能级示意图

可以看出,Tm:YAP晶体 3H_6 能带吸收790 nm的

泵浦光,离子从基态跃迁到 3H_4 ,激光上能态 3F_4 通过交叉弛豫CR过程获得粒子数布局:一个粒子由 3H_4 能带跃迁到 3F_4 能带,另一个粒子由 3H_6 能带被激发到 3F_4 能带。交叉弛豫过程使每吸收一个泵浦光子会产生两个激发态粒子,理论泵浦量子效率最大值等于2,这是Tm $^{3+}$ 激光器的一个显著特点。Tm:YAP激光器还存在上转换效应,位于激发态 3F_4 的粒子通过自发辐射弛豫到基态 3H_6 上,同时其他的激发态粒子通过吸收自发辐射的能量跃迁到更高的能级。上转换效应会造成激光器上能级粒子数减少,从而降低激光器的输出效率。

2 Tm:YAP板条激光器速率方程模型的建立

根据图2中Tm:YAP激光器的跃迁能级示意图,并考虑交叉弛豫和上转换过程,常温下连续运转Tm:YAP激光器的速率方程如下式所示^[8-9]。

$$\begin{cases} \frac{dN_4}{dt} = \frac{c_0}{n} \sigma_{\text{abs}}(\lambda_p) (P_f + P_r) \left(N_1 - \frac{f_3}{f_0} N_4 \right) - \\ \quad k_{4212} N_4 N_1 + k_{2124} N_2^2 - \frac{N_4}{\tau_4} \\ \frac{dN_3}{dt} = k_{2123} N_2^2 - k_{3212} N_3 N_1 + \beta_{43} \frac{N_4}{\tau_4} - \frac{N_3}{\tau_3} \\ \frac{dN_2}{dt} = 2k_{4212} N_1 N_4 + 2k_{3212} N_3 N_1 - \\ \quad 2(k_{2123} + k_{2124}) N_2^2 - \frac{N_2}{\tau_2} + \\ \quad \beta_{32} \frac{N_3}{\tau_3} + \beta_{42} \frac{N_4}{\tau_4} - \frac{c_0}{n} \sigma_{\text{em}}(\lambda_l) (S_f + S_r) \cdot \\ \quad \left(N_2 - \frac{f_1}{f_2} N_1 \right) \\ N_1 = N_{\text{Tm}} - \sum_{i=2}^4 N_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, N_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为能级 i 的粒子数密度; c_0 为真空中的光速; n 为 Tm:YAP 的折射率; $\sigma_{\text{abs}}(\lambda_p)$ 为泵浦波长的有效吸收截面; P_f 和 P_r 分别为谐振腔中前向和后向传输的泵浦光光子数密度; f_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为各能级的波尔兹曼占有因子; k_{ijkl} ($i, j, k, l=1, 2, 3, 4$) 为能级 $i \rightarrow j$ 与 $k \rightarrow l$ 的能量转移系数; τ_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为能级 i 的自发跃迁能级寿命; β_j ($i=2, 3, 4, j=1, 2, 3$) 为能级 $i \rightarrow j$ 的荧光分支比; $\sigma_{\text{em}}(\lambda_l)$ 为激光波长的有效发射截面; S_f 和 S_r 分别为谐振腔中前向和后向传输激光光子数密度; N_{Tm} 为总的 Tm $^{3+}$ 密度。

Tm:YAP 为激光晶体的固体激光器,在高功率

运转的情况下,热透镜效应比较明显,因此选用板条形状的激光晶体代替块状或者棒状激光晶体增加散热,同时为了让晶体热量积累均匀,转换效率更高,采用双端泵浦方式,其示意图如3所示。

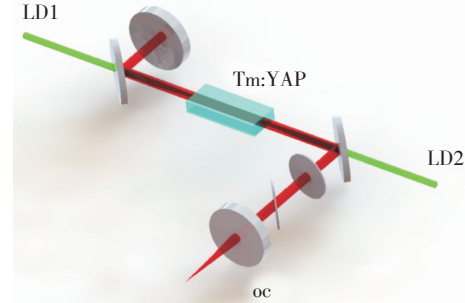


图3 Tm:YAP板条激光器泵浦方式示意图

通过对连续Tm:YAP激光的速率方程进行数值分析,可以对激光输出性能进行理论模拟。通过分析不同实验参数对激光输出性能影响,可以对Tm:YAP实验参数进行优化,为谐振腔的设计和以后激光实验参数的选择打下基础。表1为数值分析Tm:YAP激光器输出特性所采用的参数。

表1 Tm:YAP激光输出特性模拟所使用的参数

参数名称	参数符号[单位]	参数值
晶体尺寸	[mm ³]	1×6×22
晶体切割轴	-	a-cut
晶体掺杂浓度	N_{Tm}	2.2 at. %
热导率	K_c [W/(cm.K)]	0.11
热转换系数	η_h	0.22
折射率	n	1.92
晶体边界温度	$T(R_b, z)$ [K]	290
泵浦光腰半径	w_{p0} [μm]	350
泵浦光腰在晶体中的位置	z_0 [mm]	6
泵浦波长	λ_p [nm]	793
泵浦光光束质量	M_p^2	65
泵浦量子效率	η_p	1.84
泵浦波长小信号吸收系数	a_0 [cm ⁻¹]	1.7
激光上能级寿命	τ_2 [ms]	4.4
总上转换损失常数	$k_{\Sigma m}$ [cm ³ /s]	1.5×10^{-18}
输出镜透过率	T	30%
谐振腔往返损失	Δ	3%

3 Tm:YAP板条激光器输出特性的数值分析

3.1 晶体内部温度分布对输出功率影响

图4为考虑和忽略晶体温度分布时Tm:YAP激光器的输出特性。

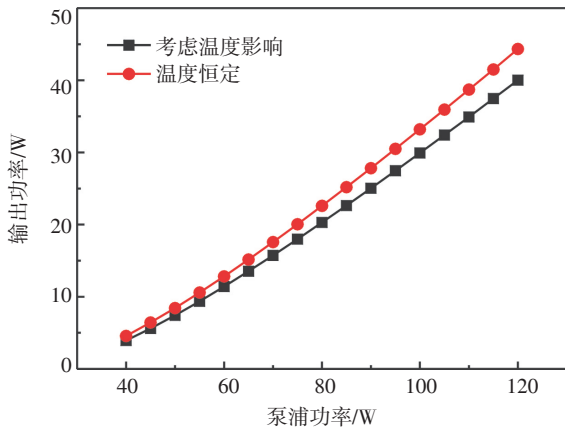


图4 考虑和忽略晶体温度分布对Tm:YAP激光器输出功率影响

可以明显看出,在考虑温度影响下,Tm:YAP输出功率的理论模拟结果要略小于不考虑晶体温度分布情况,并且随泵浦功率增大,二者之间的差异更加明显。主要是由于在固体激光器连续运转过程中,增益介质在泵浦激光激励下会产生较为明显的温度分布,而不同位置处的晶体温度分布差异会导致激光晶体上下能级的玻尔兹曼因子重新分布,从而对激光器的输出特性造成影响。

3.2 上转换效应对输出功率的影响

对于单掺Tm³⁺激光器来说,晶体的上转换效应随Tm³⁺的掺杂浓度增大而增大。实验中Tm³⁺掺杂浓度为2.2at.%,因此研究上转换效应对Tm:YAP激光器输出功率影响是必要的。图5为考虑晶体内部温度影响时上转换效应对Tm:YAP激光器输出功率的影响。从图可见,上转换损失系数对Tm:YAP激光器输出激光阈值影响较大(阈值随上转换损失系数增大而显著提高),而对斜率效率影响较小。随上转换损失系数增大,激光器最大输出功率逐渐降低。

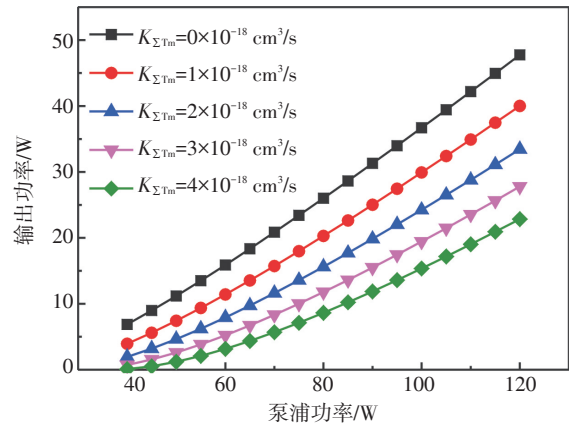


图5 上转换效应对Tm:YAP激光器输出功率影响

3.3 泵浦光斑尺寸对输出功率的影响

对于光纤耦合输出的半导体激光器来说,其光束质量可以由下面公式粗略估计

$$\theta_p = \frac{D_c NA}{2\pi w_{p0}}, \quad M_p^2 = \frac{n\pi w_{p0}\theta_p}{\lambda_p} \quad (3)$$

其中, D_c 表示为光纤芯径;NA表示光纤数值孔径; n 表示光纤折射率; w_{p0} 表示泵浦光光腰半径大小; θ_p 表示远场发散半角; λ_p 表示泵浦光波长。当泵浦光束质量为确定值时,泵浦光斑越小,发散角越大,易导致晶体内部泵浦光强分布不均匀;而且较小的泵浦光斑容易造成Tm:YAP晶体的强烈的热效应,从而限制泵浦光最大注入泵浦功率。图6表示理论计算不同泵浦光斑尺寸对Tm:YAP激光器输出功率的影响。

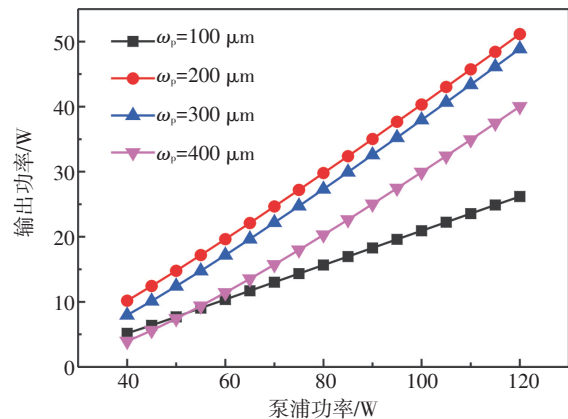


图6 泵浦光斑大小对输出功率的影响

由图中可以看出,泵浦光斑尺寸越小,Tm:YAP激光器阈值越低,并且泵浦光斑在100~400 μm 时,Tm:YAP激光器斜率效率基本相同,并且远大于泵浦光斑为100 μm 情况。

3.4 输出镜透过率对输出功率的影响

输出镜透过率决定着激光增益介质的增益系数,对激光器的输出性能和输出波长具有重要的影响。图7为理论计算的不同输出镜透过率条件下对Tm:YAP激光器输出功率的影响。

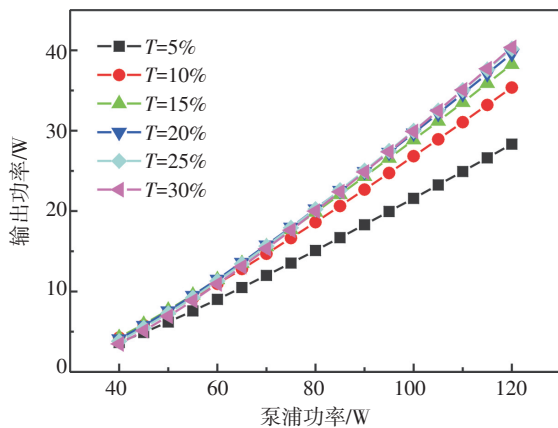


图7 输出镜透过率对输出功率的影响

从图中可以看出,Tm:YAP激光器输出激光的斜率效率随透过增大而增大,在输出镜透过率为15%~30%过程中,输出功率并无明显差异。在最大泵浦功率为120 W情况下,最佳透过率输出镜为30%附近。

通过数值仿真Tm:YAP晶体温度分布、上转换效应、泵浦光斑尺寸以及输出镜透过率等参数对板条激光器输出特性的影响,可以看出,晶体温度分布差异会导致激光晶体上下能级的玻尔兹曼因子重新分布;上转换损失系数增大,激光器最大输出功率逐渐降低;泵浦光斑越小,发散角越大,导致晶体内部泵浦光强分布不均匀,容易造成Tm:YAP晶体的强烈的热效应;输出镜透过率影响着激光增益介质的增益系数。合理设置这些参数对获得高功率激光输出具有重要意义,因此在设计高功率板条激光器时,应控制晶体上下表面的温度分布,减少温度差异,适当降低晶体的掺杂浓度可以降低上转换损失和激光的出光阈值,合理设置泵浦光斑尺寸和输出镜透过率,增大泵浦光的瑞利长度,可以减少热效应对激光器稳定性的影响,即可提高激光器的

输出性能和光光转换效率。

4 结 论

建立了在双端泵浦Tm:YAP板条晶体条件下激光能级跃迁的准三能级速率方程模型,通过对Tm:YAP板条激光器准三能级速率方程进行求解,数值模拟了Tm:YAP板条激光器的输出性能,包括晶体温度分布、上转换效应、泵浦光斑尺寸以及输出镜透过率等参数。通过数值分析不同参数对Tm:YAP板条激光器输出性能的影响,可以对Tm:YAP实验参数进行优化,为谐振腔的设计和高功率Tm:YAP板条激光器输出性能的提升打下理论基础。

参考文献

- [1] Hderson S W, Suni P J M, Hale C P, et al. Coherent laser radar at $2\mu\text{m}$ using solid-state lasers [C]//Geoscience and Remote Sensing IEEE, 1993, 31(1): 4-15.
- [2] Humbach O, Fabian H, Grzesik U, et al. Analysis of OH absorption bands in synthetic silica [J]. Journal of Non-crystalline Solids, 1996, 203: 19-26.
- [3] Scholle K, Lamrini S, Koopmann, et al. $2\mu\text{m}$ laser sources and their possible applications frontiers in guided wave optics and optoelectronics[C]//ISBN, 2010, 978-953-7619-82-4.
- [4] Stoneman R C, Esterowitz L. Efficient $1.94\mu\text{m}$ Tm:YALO laser[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 1995, 1(1):78-81.
- [5] Temel B, Özgür T, Hamit K, et al. Modulated and continuous-wave operations of low-power thulium (Tm:YAP) laser in tissue welding[J]. Journal of Biomedical Optics, 2010, 15(3): 038001.
- [6] Bilici T, Mutlu S, Kalaycioglu H, et al. Development of a thulium (Tm:YAP) laser system for brain tissue ablation [J]. Springer, 2011(26): 699-706.
- [7] Temel B, Özgür T, Hamit K, et al. Skin tissue ablation by Thulium (Tm:YAP) laser at 1980 nm[C]//Proc of CLEO, 2009: CL_P11.
- [8] Stoneman R C, Esterowitz L. Efficient $1.94\mu\text{m}$ Tm:YALO laser[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 1995, 1(1): 78-81.
- [9] Li H S, Zhao M, Xu W H. Experimental study on the $1.94\mu\text{m}$ laser performance of c-cut Tm:YAP crystal with various doping concentration[J]. Laser Physics, 2012, 22(9): 1378-1380.
- [10] 刘善超,刘洋,刘磊,等.液体冷却大面泵浦板条激光器的波前畸变研究[J].激光与红外,2015,45(3):266-270.