



796 nm 二极管泵浦连续波 1.88 W Tm:LYF 激光器

丁本利, 周雄, 夏海平, 张百涛, 陈宝玖

引用本文:

丁本利, 周雄, 夏海平, 等. 796 nm 二极管泵浦连续波 1.88 W Tm:LYF 激光器[J]. *发光学报*, 2020, 41(7): 819–825.

DING Ben-li, ZHOU Xiong, XIA Hai-ping, et al. 796 nm Diode-pumped 1.88 W Continuous-wave Tm: LYF Laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(7): 819–825.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/fgxb20204107.0819>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于多层石墨烯可饱和吸收体的被动调Q Ho:YAG 激光器

Passively Q-switched Ho:YAG Laser with Multilayer Graphene-based Saturable Absorber

发光学报. 2016, 37(6): 696–700 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163706.0696>

Er³⁺掺杂Na₅Lu₉F₃₂单晶体的红外光学特性

Infrared Optical Properties of Er³⁺ Doped Na₅Lu₉F₃₂ Single Crystal

发光学报. 2016, 37(10): 1189–1194 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163710.1189>

瓦级激光二极管端面抽运 351 nm 紫外激光器

Watt-class Laser Diode End-pumped 351 nm Ultraviolet Laser

发光学报. 2016, 37(11): 1367–1371 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163711.1367>

LD 侧面泵浦 Nd:YVO₄ 高重复频率紫外激光器

LD-side Pumping Nd:YVO₄ High Repetition Rate UV Laser

发光学报. 2019, 40(8): 1011–1014 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194008.1011>

Tm³⁺/Ho³⁺共掺碲酸盐微结构光纤激光器

Tm³⁺/Ho³⁺Co-doped Tellurite Microstructure Fiber Lasers

发光学报. 2015, 36(1): 94–98 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153601.0094>

文章编号: 1000-7032(2020)07-0819-07

796 nm 二极管泵浦连续波 1.88 W Tm:LYF 激光器

丁本利¹, 周 雄¹, 夏海平^{1*}, 张百涛^{2*}, 陈宝玖³

(1. 宁波大学 光电子材料重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 山东大学晶体材料研究所 晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100;

3. 大连海事大学 物理系, 辽宁 大连 116026)

摘要: 用坩埚下降法生长了 Tm³⁺ 掺杂浓度分别为 0.8% 和 1.3% 的优质大尺寸 LiYF₄ (LYF) 单晶体。测定了单晶体的吸收光谱、发射光谱, 并计算了³F₄ 能级的最大吸收截面与最大发射截面分别为 $0.25 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 和 $0.33 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。以 796 nm 半导体激光器 (LD) 为泵浦源, 采用短平板腔结构模型研究了 Tm 掺杂 LYF 单晶体在 $\sim 2.0 \mu\text{m}$ 波段的激光输出性能。当 LD 泵浦功率为 3.4 W 时, Tm:LYF 晶体的最大激光输出功率为 1.88 W, 相应的光光转换效率和斜率效率分别为 51% 和 57%。使用半导体可饱和吸收镜抽运 Tm 掺杂 LYF 单晶体, 测试其在 $\sim 2.0 \mu\text{m}$ 波段连续波锁模激光运转。当最大抽运功率为 3.5 W 时, 获得锁模激光的最大平均输出功率为 200 mW, 此时锁模脉冲宽度 $\sim 20 \text{ ps}$, 对应的重复频率 63.86 MHz, 中心谱线为 $1.88 \mu\text{m}$ 。结果表明, Tm 掺杂 LYF 单晶体是一种具有较好物理性能的 $\sim 2 \mu\text{m}$ 波段超快激光晶体。

关键词: Tm 离子; $2.0 \mu\text{m}$; 连续波; 连续波锁模

中图分类号: O734; O782; TN248

文献标识码: A

DOI: 10.37188/fgxb20204107.0819

796 nm Diode-pumped 1.88 W Continuous-wave Tm:LYF Laser

DING Ben-li¹, ZHOU Xiong¹, XIA Hai-ping^{1*}, ZHANG Bai-tao^{2*}, CHEN Bao-jiu³

(1. Key Laboratory of Photo-electronic Materials, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. State Key Laboratory of Crystal Materials, Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China;

3. Department of Physics, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

* Corresponding Authors, E-mail: hpxcm@nbu.edu.cn; btzhang@sdu.edu.cn

Abstract: High quality LiYF₄ (LYF) single crystals in big size doped with Tm³⁺ in 0.8% and 1.3% concentrations were grown by Bridgman method. The absorption spectra and emission spectra were measured. The maximum absorption cross section and maximum emission cross section of ³F₄ level were calculated to be $0.25 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ and $0.33 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, respectively. The laser output of Tm³⁺ doped LYF crystals in the $\sim 2.0 \mu\text{m}$ band was carried out by using short flat-flat cavity taking 796 nm semiconductor laser as pumping source. A maximum CW output of 1.88 W at an absorbed pump power of 3.4 W was achieved from the Tm³⁺ doped LYF single crystal, and the corresponding conversion efficiency and slope efficiency for the laser output were 51% and 57%, respectively. A Tm-doped LYF single crystal was pumped using a semiconductor saturable absorption mirror, and its operation in a $\sim 2.0 \mu\text{m}$ band CW laser was tested. When the maximum pump power is 3.5 W, the maximum average output power of the mode-locked laser is 200 mW. At this time, the mode-locked pulse width is about 20 ps, the corresponding repetition frequency is 63.86 MHz, and

收稿日期: 2020-05-02; 修订日期: 2020-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(51772159); 浙江省自然科学基金(LZ17E020001)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(51772159); Natural Science Foundation of Zhejiang Province(LZ17E020001)

the center line is 1.88 μm . The results show that the Tm-doped LYF single crystal is a $\sim 2 \mu\text{m}$ band ultrafast laser crystal with good physical properties.

Key words: thulium ion; 2.0 μm ; continuous-wave(CW); continuous-wave(CW) mode-locked

1 引 言

近几十年来, $\sim 2 \mu\text{m}$ 波段的红外激光因其在医学和大气监测领域的特殊应用而备受关注^[1-5]。目前, 尽管有许多激光器可以产生 $\sim 2 \mu\text{m}$ 的激光输出^[6-8], 但是固体激光器由于其增益介质的多样性、易操作性和小型化等优点, 成为最常见的一类激光器。近年来, 随着商用半导体激光技术的发展, 由激光二极管泵浦的 $\sim 2 \mu\text{m}$ 固体激光器以其转换效率高、输出功率大、体积小、成本低等优势成为研究的热点^[9-11]。在所有固体激光材料中, 稀土离子掺杂的单晶因其化学稳定性高、发光效率高等特性, 成为 $\sim 2 \mu\text{m}$ 激光器的理想候选材料。在稀土离子中, 由于 Tm^{3+} 离子的 ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ 能级跃迁, 可产生 $\sim 2 \mu\text{m}$ 的荧光发射。同时, Tm^{3+} 离子由于离子间的交叉弛豫能量转移 (${}^3\text{H}_6, {}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4, {}^3\text{F}_4$) 过程, 在 $\sim 800 \text{ nm}$ 商用 LD 泵浦下, 可实现量子效率接近 200% 的 $2 \mu\text{m}$ 的红外激光输出^[12]。因此, Tm^{3+} 掺杂单晶体有望成为一种性能优异的 $\sim 2 \mu\text{m}$ 红外激光材料。

到目前为止, 在 Tm^{3+} 离子掺杂的 LiLuF_4 ^[13]、GGAG 单晶^[14] 中实现了 $\sim 2 \mu\text{m}$ 的激光输出。 LiYF_4 (LYF) 单晶具有较低的声子能量 (440 cm^{-1})、较长的荧光寿命和较低的折射率, 是一种优良的稀土离子激光介质^[15]。当 LYF 作为 Tm^{3+} 离子的激光基质时, 由于中心格位离子 Y^{3+} (0.0893 nm) 与掺杂离子 Tm^{3+} (0.087 nm) 的离子半径非常接近, 可望实现高浓度的掺杂从而获得优质的单晶体质量。

以 LYF 单晶体为基质的材料几乎实现了从紫外到红外的激光输出。尽管已有许多关于 $\sim 2 \mu\text{m}$ 波段输出的 Tm^{3+} 掺杂 LYF (Tm: LYF) 激光器的报道^[16-17], 但是很少有关 Tm: LYF 单晶体的光谱特性与激光性能之间的综合性能的关系研究。

在本工作中, 用坩埚下降法生长了两种不同 Tm^{3+} 离子掺杂浓度的 LYF 单晶体, 系统地研究了

单晶体的光谱特性。采用短平板腔结构研究了 Tm: LYF 激光器的 $\sim 2 \mu\text{m}$ 红外激光连续波输出特性, 采用激光二极管抽运 Tm: LYF 晶体, 使用 SESAM 被动锁模元件, 对 $\sim 2 \mu\text{m}$ 波段全固态连续波锁模激光进行了研究。

2 实 验

以纯度为 99.999% 的 LiF 、 YF_3 、 TmF_3 氟化物粉体为原料, 采用坩埚下降法生长了 Tm: LYF 晶体。其详细的坩埚下降法生长过程见文献^[13]。

将生长的单晶体切成小片, 然后经磨砂后抛光成厚度大约为 2 mm 的薄片用于光学测试。采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP) 测定了 LiYF_4 单晶中 Tm^{3+} 离子的实际浓度。稀土离子在配料中的浓度和测量得到的浓度见表 1。样品的吸收光谱由 Cary 5000 紫外/可见/近红外分光光度计 (Agilent Co., America) 测定, 晶体的透光方向平行于 a 轴。样品的发射光谱由 FLSP-920 型光谱仪 (Edinburgh Co., England) 测量。以上光谱测试均在室温下进行。

表 1 原料中 Tm^{3+} 的摩尔分数和 LiYF_4 单晶中 Tm^{3+} 离子的测量浓度

Tab. 1 Molar fractions of Tm^{3+} in raw material and measured concentrations of Tm^{3+} ions in LiYF_4 single crystals

| 样品 | Tm^{3+} (in raw material) / % | Measured Tm^{3+} / ($10^{20} \text{ ions} \cdot \text{cm}^{-3}$) |
|----|--|---|
| 1 | 0.8 | 1.95 |
| 2 | 1.3 | 3.16 |

选取光学性能良好的 Tm^{3+} 稀土掺杂大尺寸优质 LiYF_4 单晶体, 经过定向、抛光后加工成尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 、方向为 $a \times c \times a$ 的激光棒。研究 LiYF_4 激光棒中稀土离子的 $2 \mu\text{m}$ 激光输出参数特性。 Tm^{3+} 在 LiYF_4 晶体中的浓度大约为 0.8% 与 1.3%。

使用如图 1 所示的实验装置进行激光测试。采用 796 nm LD 连续激光作为激发源, 泵浦光沿

着 a 轴方向入射样品, 0.2 mm 纤芯、0.22 mm 发射口径的短平板腔结构进行激光实验。晶体未镀膜, 膜系镀在镜片上。输出镜使用 $T=2\%$ 、5% 的平面镜, 输入镜使用曲率为 200 mm 的凹面镜。为了消除晶体内部的积温, 要求 Tm: LYF 晶体的温度始终保持在 18 °C。使用激光光谱仪 (APE WaveScan, APE Inc.) 测量输出光谱。

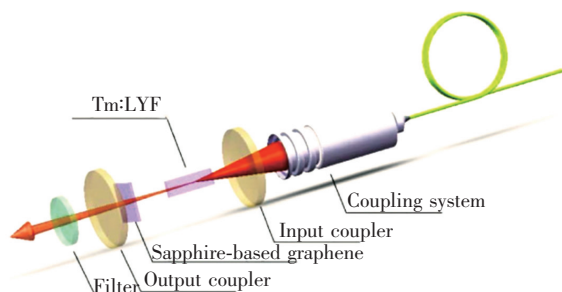


图1 2.0 μm 连续波 Tm: LYF 激光器实验装置图
Fig. 1 Schematic setup of 2.0 μm CW Tm: LYF laser

Tm: LYF 锁模激光实验装置如图2所示, 采用 2.31 m 长的 Z 型折叠腔。将透过率 2% 的输出镜 OC 插入到 Z 型腔中并使光路进一步折叠, 这时从输出镜 OC 输出两路性质相同的激光。输入镜 M1 和输出镜 OC 均为平镜, 腔镜 M2 和 M3 是凹面镜, 并且它们的曲率半径分别为 500 mm 和 200 mm, 另外腔镜 M3 的焦点位置放 SESAM, 用作反射腔镜。同样采用 796 nm LD 连续激光作为激发源, 芯径为 0.2 mm, 数值孔径 0.22。采用 Tm^{3+} 掺杂浓度为 1.3% 的 LYF 晶体作为激光增益介质, 晶体的尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 3 mm, 两边镀减反膜, 经铝箔包裹后放入水循环制冷器具中, 使温度始终维持在 18 °C。此外, 我们用 Pulse Check 150 自相关仪 (德国 APE 公司) 测量锁模脉冲宽度。

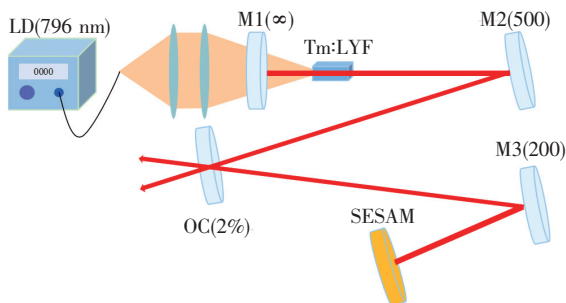


图2 Tm: LYF 晶体 SESAM 连续波锁模激光器原理图
Fig. 2 Schematic of CW mode-locked Tm: LYF laser with SESAM

3 结果与讨论

3.1 光谱性能

图3(a)为 Tm^{3+} 掺杂 LiYF_4 单晶在 400 ~ 2 000 nm 波段的吸收光谱。 Tm^{3+} 的特征吸收带所对应的相应能级也在图中标出。从图可见, 当掺杂浓度从 0.8% 增大到 1.3% 时, 其吸收强度也相应增大, 基本呈现线性关系, 其吸收峰位基本不变。图3(b)为 796 nm LD 激发下, Tm^{3+} 掺杂浓度分别为 0.8% 与 1.3% 时 LYF 单晶体在 1 600 ~ 2 100 nm 波段的荧光发射光谱。可以观察到, Tm^{3+} 离子掺杂的 LYF 单晶体从 1 650 ~ 2 000 nm 呈现一宽约为 350 nm 的荧光发射带, 它是由 $^3\text{F}_4$ 能级向基态 $^3\text{H}_6$ 辐射跃迁所致。荧光带出现分裂的现象主要是由于晶体的晶格场产生能级分裂所导致。同时可见, 随着 Tm^{3+} 离子掺杂浓度从 0.8% 增加到 1.3%, 1.8 μm 处的荧光强度随之增大。因此, 可适当地提高 Tm^{3+} 离子的掺杂浓度来增加荧光的发射强度。

吸收与发射截面是两个影响 2 μm 激光性能的重要参数。根据测定的吸收光谱 (图3), 应用以下公式可计算吸收截面^[18]:

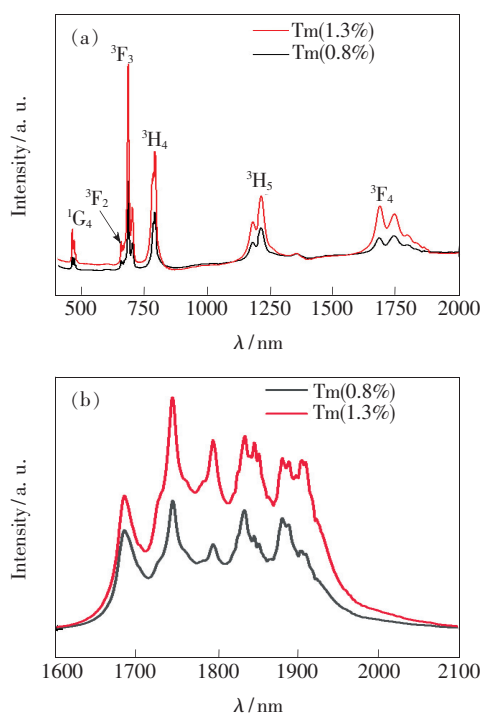


图3 (a) Tm: LYF 晶体的吸收光谱; (b) Tm: LYF 晶体的发射光谱。

Fig. 3 (a) Absorption spectra of the Tm: LYF crystals. (b) Fluorescence emission spectra of the Tm: LYF crystals.

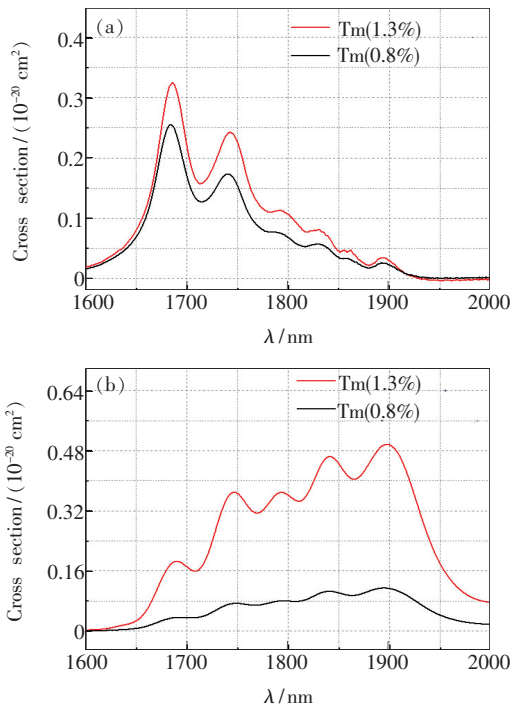


图 4 (a) Tm^{3+} 为 1.3% 和 0.8% 时的 $\text{Tm}:\text{LYF}$ 晶体 $\text{Tm}^{3+} : ^3\text{F}_4$ 能级的吸收截面; (b) $\text{Tm}:\text{LYF}$ 晶体 $\text{Tm}^{3+} : ^3\text{F}_4$ 能级的发射截面。

Fig. 4 (a) Absorption cross-sections for the $\text{Tm}^{3+} : ^3\text{F}_4$ manifold of the $\text{Tm}:\text{LYF}$ crystals with Tm^{3+} of 1.3% and 0.8%. (b) Emission cross-sections for the $\text{Tm}^{3+} : ^3\text{F}_4$ manifold of the $\text{Tm}:\text{LYF}$ crystals.

$$\sigma_{\text{abs}}(\lambda) = \frac{2.303 \lg(I_0/I)}{NL} = \frac{\beta}{N}, \quad (1)$$

其中 L 为样品厚度, N 为 Tm^{3+} 离子浓度, $\lg(I_0/I)$ 为从测量吸收光谱中获得的光密度, β 为吸收系数。图 4(a) 为计算获得的 0.8% 与 1.3% Tm^{3+} 掺杂 LYF 单晶体中 $^3\text{F}_4$ 能级的吸收截面随波长变化图。从图中可见, 在 1 680 nm 波段, 0.8% 与 1.3% 掺杂单晶体的吸收发射截面均达到最大, 分别为 $0.25 \times 10^{-20} \text{ cm}^{-2}$ 与 $0.33 \times 10^{-20} \text{ cm}^{-2}$ 。

发射截面可用 McCumber 公式计算^[19]:

$$\sigma_{\text{em}}(\lambda) = \sigma_{\text{abs}}(\lambda) \frac{Z_1}{Z_u} \exp\left(\frac{E_{z1} - hc/\lambda}{KT}\right), \quad (2)$$

其中 Z_1 和 Z_u 分别是参与能级跃迁的上、下配分函数; K 和 T 分别是玻尔兹曼常数和室温; c 、 h 和 λ 分别是光速、普朗克常数和跃迁波长; E_{z1} 表示在温度不变时将一个 Tm^{3+} 离子从基态激发到某一激发态所需的自由能, 可用文献[18]方法计算得到 $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$ 跃迁峰值处的自由能为 $5\,938 \text{ cm}^{-1}$ 。

图 4(b) 为计算获得的 Tm^{3+} 掺杂 LYF 单晶体

在 1 600 ~ 2 000 nm 波段的发射截面随波长的变化图。0.8% 与 1.3% 掺杂 LYF 晶体最大发射截面在 1 897 nm 处, 分别为 $0.12 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 与 $0.50 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 其值明显大于 Tm^{3+} 掺杂的氧化物晶体^[19]。高的发射截面受益于基质材料的优异性能, 有利于激光的增益性能。

3.2 激光性能

采用激光器实验装置(图 1), 在 796 nm 半导体激光泵浦下, 研究了 $\text{Tm}:\text{LYF}$ 晶体的 $\sim 2 \mu\text{m}$ 连续波激光运转输出实验。图 5(a)、(b) 为 0.8% 与 1.3% 两种 Tm^{3+} 掺杂浓度的 $\text{Tm}:\text{LYF}$ 激光器在输出耦合镜的透过率 T 为 2%、5% 时, 其输出功率与泵浦吸收功率之间的关系图。当输出耦合镜的透过率 $T = 2\%$ 、5% 时, 0.8% 掺杂的 LYF 单晶体产生最大连续波输出功率分别为 0.92 W 和 0.68 W, 相应的光光转换效率分别为 56% 和 42%, 斜率效率分别为 67% 和 52%; 1.3% 掺杂的 LYF 单晶体产生最大连续波输出功率为 1.88 W 和 1.56 W, 相应的光光转换效率分别为 57% 和 49%, 斜率效率分别为 51% 和 46%。在不改变输出耦合镜透过率的情况下, 连续波输出功率随着 Tm^{3+} 掺杂浓度变大, 表明提高 Tm^{3+} 掺杂浓度可以获得更高的连续波输出功率和光转换效率。这是由于 Tm^{3+} 离子浓度高, 离子之间的距离变近, 将产生强烈的交叉弛豫现象 ($^3\text{H}_6 + ^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4 + ^3\text{F}_4$), 使大量的 Tm^{3+} 离子聚集在 $^3\text{F}_4$ 能级上, 此时参与 2.0 μm 激光发射的离子数增加, 因此 2.0 μm 的激光效率也随着增加。但是过高的浓度会引起浓度猝灭效应。另外, 对于连续波 $\text{Tm}:\text{LYF}$ 晶体激光运转, 这种 $\text{Tm}:\text{LYF}$ 晶体激光器的输出耦合镜的最佳透过率为 2%。图 5(c) 为 0.8% 与 1.3% 掺杂 LYF 晶体连续激光的输出光谱图。如图所示, 0.8% 掺杂的 LYF 单晶体与 1.3% 掺杂的 LYF 单晶体产生的峰波长都是以 1 907 nm 为中心, 前者半峰全宽为 22 nm, 而后者半峰全宽为 30 nm, 可以看出 Tm^{3+} 离子浓度增加, 激光光谱的半峰全宽变宽。总之, 实验获得了稳定的 1.88 W 激光输出。

采用激光器实验装置(图 2), 在 796 nm 半导体激光泵浦下, 研究了 $\text{Tm}(1.3\%):\text{LYF}$ 晶体的 $\sim 2 \mu\text{m}$ 激光连续波激光输出锁模实验。如图 6(a) 所示, 当吸收抽运功率超过 0.5 W 时, 激光开始振荡。继续增加吸收抽运功率, 当超过 1.9 W

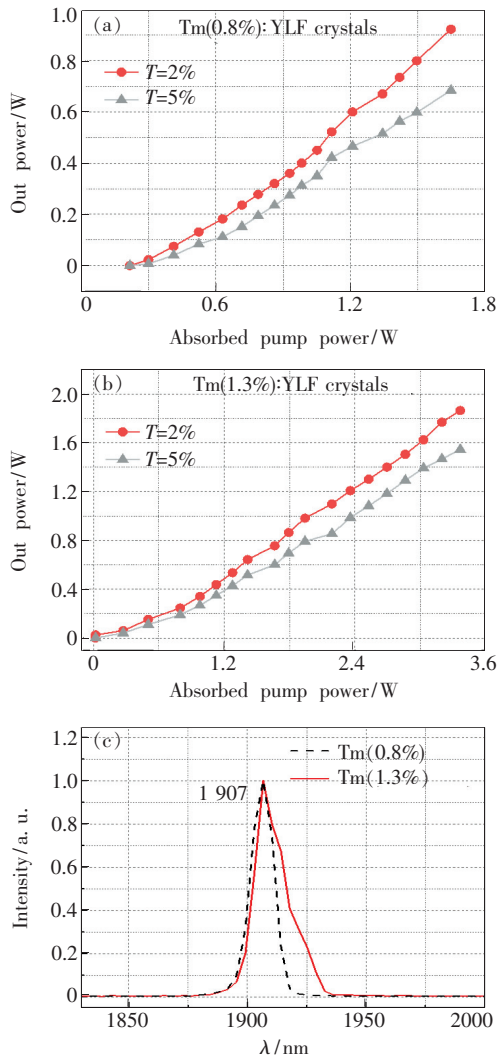


图 5 (a) 对于 Tm(0.8%):LYF 晶体, 不同输出耦合器的输出功率与吸收的泵浦功率的关系; (b) 对于 Tm(1.3%):LYF 晶体, 不同输出耦合器的输出功率与吸收的泵浦功率的关系; (c) Tm^{3+} 离子浓度为 1.3% 和 0.8% 时, 连续波激光器的发射光谱。

Fig. 5 (a) Output power *versus* absorbed pump power for different output couplers for Tm(0.8%):LYF. (b) Output power *versus* absorbed pump power for different output couplers for Tm(1.3%):LYF. (c) Emission wavelengths of the CW laser of the Tm:YLF crystals with Tm^{3+} of 1.3% and 0.8%.

时, 激光开始从调 Q 锁模运转模式转到连续波锁模模式, 相对应的输出功率为 100 mW。当吸收功率增大到 3.0 W 时, 获得最大连续波输出功率为 168 mW, 且激光开始从连续波锁模模式回到调 Q 锁模运转模式。当吸收功率增大到 3.5 W 时, 获得最大激光输出, 输出功率为 200 mW。如图 6(b) 为连续波锁模激光的光谱, 中心波长为

1.88 μm , 谱线宽度为 7 nm。图 7 为较短时域的锁模脉冲序列, 可以看出锁模脉冲的重复频率为 63.86 MHz, 脉冲宽度约为 20 ps, 若进一步优化腔型结构, 补偿腔内色散, 可获得 ~ 100 fs 的激光输出。

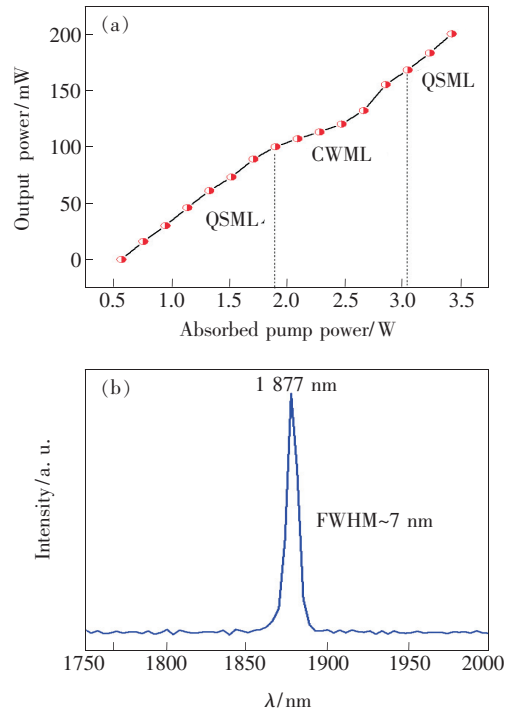


图 6 (a) Tm:LYF 连续波锁模激光平均输出功率; (b) Tm:LYF 连续波锁模激光光谱。

Fig. 6 (a) Average output power of CW mode-locked Tm:YLF laser. (b) Emission wavelengths of the CW mode-locked laser of the Tm:YLF crystal.



图 7 Tm:LYF 连续波锁模激光器的脉冲序列
Fig. 7 Pulse trains of the CWML Tm:LYF laser

4 结 论

综上所述, 生长并分析了两种不同 Tm^{3+} 离子掺杂浓度的高质量 Tm:LYF 晶体。计算并比较了与两种 YLF 单晶体激光性能有关的吸收、发射截面等光谱参数。对于 1.3% 掺杂 LYF 晶体, 它的最大吸收截面为 $0.33 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 最大发射截面为 $0.50 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。我们已经在两个 Tm:YLF

晶体中均实现了在 1.9 μm 波段的连续波激光输出。其中在 1.3% 掺杂 LYF 晶体中获得了最大的输出功率,为 1.88 W,相应的光光转换效率和斜率效率分别为 51% 和 57%。实验结果表明,Tm:LYF 单晶体的光谱特性与激光性能之间具有一定的规律,单晶体好的光谱性能对应了好的激光性

能。连续波激光器和连续波锁模激光器实验证明了 LYF 单晶体具有较好的激光参数,实现了中心波长 1.88 μm 连续波激光运转和锁模激光运转。通过优化激光布局可以进一步提高泵浦功率,使 Tm:LYF 单晶体激光器更有效地实现高功率、高效率 2.0 μm 红外激光输出。

参 考 文 献:

- [1] WULFMEYER V,RANDALL M,BREWER A,*et al.*. 2 μm Doppler lidar transmitter with high frequency stability and low chirp [J]. *Opt. Lett.*, 2000,25(17):1228-1230.
- [2] JACKSON S D. The spectroscopic and energy transfer characteristics of the rare earth ions used for silicate glass fibre lasers operating in the shortwave infrared [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2009,3(5):466-482.
- [3] SHEN D Y,MACKENZIE J I,SAHU J K,*et al.*. High-power and ultra-efficient operation of a Tm³⁺-doped silica fiber laser [C]. *Conference Proceedings from OSA Publishing,Vienna*, 2005:516.
- [4] 吴春婷,姜妍,戴通宇,等. 2 μm 掺钬固体激光器研究进展 [J]. *发光学报*, 2018,39(11):1584-1597.
WU C T,JIANG Y,DAI T Y,*et al.*. Research progress of 2 μm Ho-doped solid-state laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018,39(11):1584-1597. (in Chinese)
- [5] 李成植,姚传飞,王顺宾,等. 应用于 2.1 μm 激光的 Tm³⁺/Ho³⁺ 共掺氟碲酸盐微结构光纤研究 [J]. *发光学报*, 2016,37(1):74-80.
LI C Z,YAO C F,WANG S B,*et al.*. Tm³⁺/Ho³⁺ co-doped fluorotellurite microstructure fiber for 2.1 μm lasing [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016,37(1):74-80. (in Chinese)
- [6] RAMEIX A,BOREL C,CHAMBAZ B,*et al.*. An efficient, diode-pumped, 2 μm Tm:YAG waveguide laser [J]. *Opt. Commun.*, 1997,142(4-6):239-243.
- [7] WU C T,JU Y L,CHEN F,*et al.*. Research on 2 μm solid-state lasers [J]. *Laser Phys.*, 2012,22(4):635-647.
- [8] JACKSON S D,MOSSMAN S. High-power diode-cladding-pumped Tm³⁺,Ho³⁺-doped silica fibre laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2003,77(5):489-491.
- [9] ČERNÝ P,OSWALD J,SULC J,*et al.*. Tm:LuVO₄—a new material for 2 μm diode-pumped lasers [C]. *Conference Proceedings from OSA Publishing,Incline Village*, 2006.
- [10] YORULMAZ I,SENNAROGLU A. Low-threshold diode-pumped 2.3 μm Tm³⁺:YLF lasers [J]. *IEEE. J. Sel Top. Quantum Electron.*, 2018,24(5):1601007.
- [11] ALESHIRE C E,YU C X,REED P A,*et al.*. Efficient cryogenic near-infrared Tm:YLF laser [J]. *Opt. Express*, 2017,25(12):13408-13413.
- [12] JACKSON S D,SABELLA A,LANCASTER D G. Application and development of high-power and highly efficient silica-based fiber lasers operating at 2 μm [J]. *IEEE. J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007,13(3):567-572.
- [13] ZHANG X L,ZHANG S,XIAO N N,*et al.*. Diode-pumped passively Q-switched dual-wavelength c-cut Tm,Ho:LLF laser at 2 μm [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2014,11(3):035801.
- [14] ŠULC J,BOHÁČEK J,NĚMEC M,*et al.*. Tm:GGAG crystal for 2 μm tunable diode-pumped laser [C]. *Proceedings of SPIE 9893, Laser Sources and Applications III,Brussels*, 2016.
- [15] HU J X,XIA H P,HU H Y,*et al.*. Synthesis and efficient near-infrared quantum cutting of Pr³⁺/Yb³⁺ co-doped LiYF₄ single crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2012,112(7):073518.
- [16] LIPPERT E,NICOLAS S,ARISHOLM G,*et al.*. High-power fiber-laser-pumped mid-infrared laser sources [C]. *Proceedings Volume 6397, Technologies for Optical Countermeasures III,Stockholm*, 2006:639704-1-7.
- [17] SO S,MACKENZIE J I,SHEPHERD D P,*et al.*. A power-scaling strategy for longitudinally diode-pumped Tm:YLF lasers [J]. *Appl. Phys. B*, 2006,84(3):389-393.
- [18] 李毛和,胡和方,祈长鸿. 一种稀土离子发射截面的计算方法 [J]. *光学学报*, 2001,21(5):626-629.

LI M H, HU H F, QI C H. A method to calculate the emission cross section of rare-earth ions [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2001, 21(5):626-629. (in Chinese)

- [19] GUO W J, CHEN Y J, LIN Y F, *et al.*. Spectroscopic properties and laser performance of Tm³⁺-doped NaLa(MoO₄)₂ crystal [J]. *J. App. Phys.*, 2008, 103(9):093106-1-10.



丁本利(1997-),男,安徽安庆人,硕士研究生,2018年于台州学院获得学士学位,主要从事单晶体生长方面的研究。

E-mail: 2495899049@qq.com



张百涛(1985-),男,山东潍坊人,博士,副研究员,硕士研究生导师,2012年于山东大学晶体材料研究所获得博士学位,主要从事新型功能晶体材料的测试与表征、非线性频率变换、全固态锁模激光技术、激光放大器、中红外激光器件及新型二维材料光电特性等的研究。

E-mail: btzhang@sdu.edu.cn



夏海平(1967-),男,浙江舟山人,博士,研究员,博士研究生导师,1997年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事光学功能材料及其相应器件的研究。

E-mail: hpxcm@nbu.edu.cn