

文章编号: 1000-7032(2022)01-0042-09

Yb: LuAG 单晶光纤的连续及脉冲激光性能

马晓斐, 王 涛, 张 健*, 尹延如*, 张百涛, 贾志泰

(山东大学 晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100)

摘要: 单晶光纤是具有准一维结构的功能晶体材料, 结合了体块单晶优异的物化性能和传统光纤材料比表面积大的结构优势, 是一种极具潜力的激光增益介质。目前单晶光纤激光的研究主要集中于连续激光输出, 关于脉冲激光性能的研究相对较少。我们采用微下拉法(μ -PD)制备的 Yb: LuAG 单晶光纤(SCF)作为增益介质, 获得了输出功率大于 4 W、斜效率 21.66%、光束质量因子 M^2 接近于 1 的连续激光输出。在此基础上, 采用 MoTe₂ 作为可饱和吸收体, 实现了 Yb: LuAG SCF 最高单脉冲能量 3.39 μ J 的被动调 Q 脉冲激光输出。该工作为 Yb: LuAG SCF 在全固态高功率连续和脉冲激光器中的应用提供了参考。

关键词: 单晶光纤; Yb: LuAG; 脉冲激光; MoTe₂; 被动调 Q

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20210332

Continuous-wave and Pulsed Laser Performance of Yb: LuAG Single Crystal Fiber

MA Xiao-fei, WANG Tao, ZHANG Jian*, YIN Yan-ru*, ZHANG Bai-tao, JIA Zhi-tai

(State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China)

* Corresponding Authors, E-mail: jian.zhang@sdu.edu.cn; yyr@sdu.edu.cn

Abstract: Single crystal fiber is a kind of functional crystal material with quasi-one-dimensional structure, combining the excellent physical and chemical properties of bulk crystal with the structural advantages of large specific surface area of traditional optical fiber materials, which makes it a potential laser gain medium. At present, the research on single crystal fiber laser mainly focuses on continuous-wave laser output, while the research on its pulsed laser performance is relatively few. With Yb: LuAG single crystal fiber (SCF) prepared by micro-pull-down method(μ -PD) as the gain medium, a continuous-wave laser output of more than 4 W with a slope efficiency of 21.66% was obtained. The beam quality factor M^2 is close to 1. On this basis, the linear optical properties of saturable absorber (SA) MoTe₂ were tested, and the nonlinear saturable absorption characteristics at 532 nm and 1 064 nm were verified. Finally, a passive Q-switched Yb: LuAG single crystal fiber pulsed laser output with the highest single pulse energy of 3.39 μ J was realized. This work provides a reference for the application of Yb: LuAG SCF in all-solid-state high-power continuous-wave and pulsed lasers.

Key words: single crystal fiber; Yb: LuAG; pulsed laser; MoTe₂; passive Q-switched

收稿日期: 2021-10-27; 修订日期: 2021-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(51502157, 62105181); 山东省重点研发计划(2018CXGC0410); 山东大学青年科学基金(2018WLJH66); 青岛市博士后应用研究项目资助

Supported by National Natural Science Foundation of China(51502157, 62105181); Key Research and Development Program of Shandong Province(2018CXGC0410); Young Scholars Program of Shandong University(2018WLJH66); Qingdao Postdoctoral Applied Research Project

1 引 言

单晶光纤结合了体块单晶高热导率、高激光损伤阈值、低非线性效应和玻璃光纤大长径比、散热能力强的优势,有望成为新一代全固态激光器的激光增益介质。 $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (LuAG) 的熔点为 2 333 K,密度为 6.67 g/cm^3 ,是一种具有优异的热光学性能、高激光损伤阈值和高热导率的石榴石结构晶体。与 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG) 相比, LuAG 晶体的热导率受掺杂离子浓度增加的影响较小,有利于实现激光器的小型化和集成化。此外, Yb:LuAG 具有比 Yb:YAG 更大的有效发射横截面积,更适合于高功率固体激光器^[9]。

单晶光纤的研究还处于发展阶段,应用主要集中于高能激光^[10]和高温传感^[11]。目前,单晶光纤激光主要针对的是连续激光和主振荡功率放大器(MOPA),对于单晶光纤脉冲激光器的研究相对较少。脉冲激光相较于连续激光具有更高的峰值功率,主要应用于信息通信、激光加工和生物医疗等领域。调 Q 和锁模技术是产生脉冲激光的主要方式,其中,基于可饱和吸收体的被动调 Q 技术具有使用方便、无驱动装置、结构简单的优点,易于实现脉冲激光输出^[12]。 MoTe_2 为二维过渡金属硫化物(TMDC),具有较好的非线性光学(NLO)可饱和吸收性质,已被广泛应用于脉冲调制器。

本文对微下拉法(μ -PD)生长的 Yb:LuAG 单晶光纤进行了连续(CW)激光实验,并利用 MoTe_2 作为可饱和吸收体,实现了 $3.39 \mu\text{J}$ 的被动调 Q 脉冲激光输出。

2 实 验

2.1 样品制备

实验中的 Yb:LuAG 单晶光纤采用 μ -PD 法生长,直径 1 mm 和 3 mm, Yb^{3+} 离子掺杂浓度为

表 1 实验所用单晶光纤(SCF)的参数

Tab.1 Parameters of single crystal fiber(SCF) used in the experiment

编号	Yb^{3+} 掺杂浓度/%	生长方法	直径/mm
1#	7	μ -PD	1
2#	10	μ -PD	3
3#	10	μ -PD	3

10% 和 7%。对于实验中所用单晶光纤的生长及表征之前已有报道,所制备的单晶光纤长度均大于 100 mm ^[17]。为便于将光纤置于金属铜沉进行激光实验,截取为通光长度 8 mm,端面抛光未镀膜,具体编号和参数如表 1 所示。

2.2 MoTe_2 样品表征

分别使用 Cary 7000 分光光度计和 Perkin Elmer 100 FT-IR 分光光度计测量 MoTe_2 样品 $0.2 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 范围内的紫外-可见-近红外(UV-Vis-NIR)透射光谱和 $1.28 \sim 10 \mu\text{m}$ 的傅里叶变换红外 FTIR 透射光谱。

Z 扫描测试实验装置如图 1 所示,包括沿光路依次设置的泵浦源、分光镜、聚焦透镜、 MoTe_2 样品、第一能量计、第二能量计。分光镜将泵浦源的出射光束分为两束,第一光束透过聚焦透镜和 MoTe_2 样品后照射在第一能量计上,第二光束照射在第二能量计上作为参考光束,两个能量计连接计算机进行数据采集。实验过程中, MoTe_2 样品在轨道上沿光轴方向直线移动,当 MoTe_2 样品靠近焦点时光束能量密度逐渐升高,并在焦点位置达到最大,通过焦点后光束能量密度逐渐降低。入射源是闪光灯泵浦皮秒激光器(PL2251C),选择 532 nm(焦点处能量 $39 \mu\text{J}$ 和 $43 \mu\text{J}$)和 1 064 nm 波长(焦点处能量 $40, 60, 90 \mu\text{J}$)分别进行 Z 扫描测试。

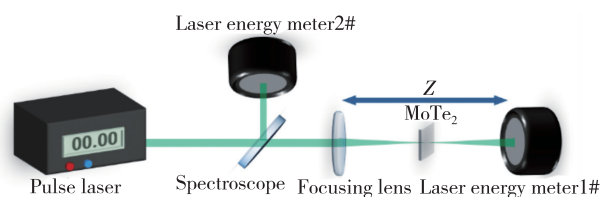


图 1 开孔 Z 扫描测试示意图

Fig.1 Schematic diagram of open aperture Z-scan test

2.3 激光实验

基于 MoTe_2 的 Yb:LuAG 单晶光纤被动调 Q 脉冲激光器示意图如图 2 所示。泵浦源为 940 nm 光纤耦合激光二极管(LD),芯径为 $200 \mu\text{m}$,数值孔径(NA)为 0.22。增益介质是仅端面抛光未镀膜透膜的 Yb:LuAG 单晶光纤 3# (10% , $\Phi = 3 \text{ mm}$)。单晶光纤安装在水冷铜块中并保持在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。聚焦耦合系统(1:1)用于将泵浦光会聚到晶体端面。 M_1 是输入镜,对 940 nm 泵浦光增透、对 1 030 nm 激光高反。输出耦合镜 M_2 在 $1 010 \sim$

1 100 nm 处的透过率为 1%、5%、10% 和 30%。 M_1 和 M_2 组成谐振腔。蓝宝石衬底上沉积的 MoTe_2 作为被动调 Q 可饱和吸收体, 插入谐振腔内进行脉冲激光调制。在 M_2 后面放置一个 1 μm 以下滤光片以阻挡剩余的泵浦光。实验中, 使用带有探头 (Newport, 919P-050-26) 的功率计 (Newport, 1919-R) 测量平均输出功率。输出光谱和脉冲分别由光谱分析仪 (YOKOGAWA, AQ6370C) 和数字荧光示波器 (Tektronix, DPO 7104) 记录, 带宽为 1 GHz。

未插入可饱和吸收体即为连续激光实验装置。实验中对表 1 中 1#~3# 不同掺杂浓度不同直径的单晶光纤分别进行了连续激光实验。

数据处理: 实验中需测试透过晶体前后的激光功率 P_p 和 P_t , 借助如下公式计算得到吸收的泵浦功率。由于单晶光纤两端仅抛光未镀增透膜, 所以需要考虑两次菲涅尔反射:

$$P_p(1-R)^2 e^{-\alpha l} = P_t, \quad (1)$$

菲涅尔反射率:

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2, \quad (2)$$

吸收率:

$$\eta = 1 - e^{-\alpha l}, \quad (3)$$

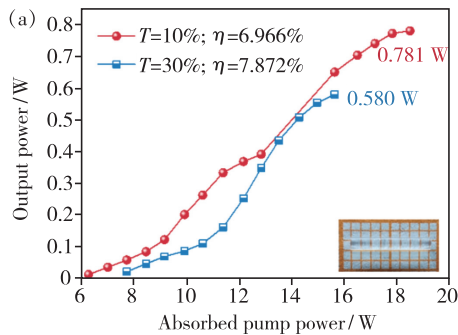


图 3 Yb:LuAG SCF 1# (7%, $\Phi=1$ mm) 在 940 nm 泵浦下输出功率(a)、光-光转化效率(b)与吸收泵浦功率的关系(插图 为相应晶体的照片)。

Fig. 3 The relationship between output power(a), opt.-opt. (O-O) conversion efficiency(b) and absorbed pump power of 1# (7%, $\Phi=1$ mm) Yb:LuAG SCF under 940 nm pump (The inset is the photograph of the corresponding crystal).

表 2 Yb:LuAG SCF 1# 的激光输出

Tab. 2 The laser output of Yb:LuAG SCF 1#

$T/\%$	输出功率/W	斜效率/%	光-光转化效率/% (最高输出功率时)
10	0.781	6.966	4.22
30	0.580	7.872	3.71

吸收功率:

$$P = (1 - e^{-\alpha l}) P_p = P_p - \frac{P_t}{(1-R)^2}, \quad (4)$$

其中 n 为晶体折射率。

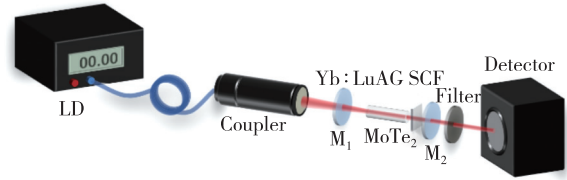


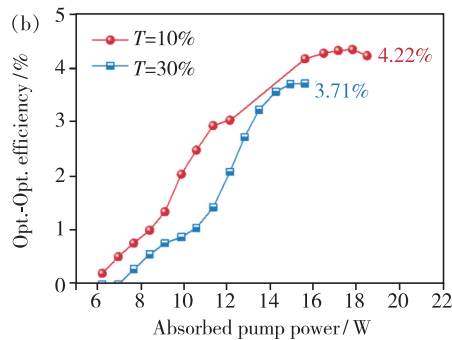
图 2 基于 MoTe_2 的 Yb:LuAG 单晶光纤 (SCF) 被动调 Q 脉冲激光器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Yb:LuAG single crystal fiber (SCF) passively Q -switched pulsed laser based on MoTe_2

3 结果与讨论

3.1 CW 激光实验

对于 μ -PD 法生长的直径 $\Phi=1$ mm、7% 掺杂的 1# Yb:LuAG SCF, 在 940 nm 泵浦, 水冷温度 18 $^{\circ}\text{C}$, 输出耦合镜透过率 $T=10\%$ 和 30% 时, 分别获得了 0.781 W 和 0.580 W 的激光输出。图 3 所示为输出功率和光-光转化效率分别与吸收泵浦功率的关系, 激光输出结果汇总于表 2。



对于 2# 直径 $\Phi=3$ mm、10% 掺杂的 Yb:LuAG 单晶光纤, 如图 4 内插图所示, 直径波动 $\sim 10.5\%$, 起伏较大, 采用 940 nm 泵浦进行连续激光实验。水冷温度设置为 16 $^{\circ}\text{C}$, 输出耦合镜透过率 $T=10\%$ 时, 获得了斜效率 14.01%、最大输出功率 1.406 W (对应的光-光转化效率为 8.562%) 的激光输出。

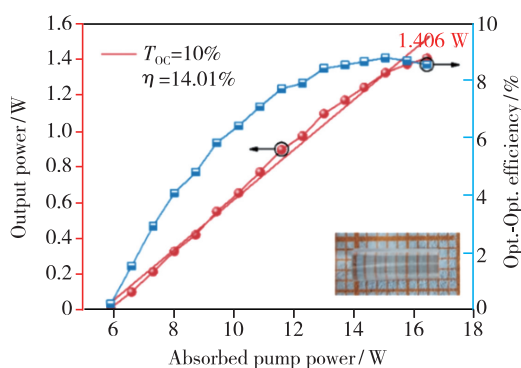


图 4 Yb: LuAG SCF 2# (10%, $\Phi = 3$ mm, 直径波动 ~ 10.5%) 在 940 nm 泵浦下输出功率、光-光转化效率与吸收泵浦功率的关系(插图为相应晶体的照片)。

Fig. 4 The relationship between output power, O-O conversion efficiency and absorbed pump power of 2# (10%, $\Phi = 3$ mm, diameter fluctuation ~ 10.5%) Yb: LuAG SCF under 940 nm pump(The inset is the photograph of the corresponding crystal).

如图 5(a)所示,对于 3#单晶光纤 (10%, $\Phi = 3$ mm, 直径波动 ~ 1%) 在 940 nm 泵浦下进行连续激光实验。其在输出镜透过率 5%、10% 和 30% 时,均获得了 >4 W 的激光输出。其中, $T = 10\%$

和 30% 的激光输出结果在此前已报道^[17]。如图 5(b)所示,当输出镜透过率为 1% 和 5% 时,对应的输出激光中心波长为 ~1 078 nm;当输出镜透过率为 10% 和 30% 时,对应的输出激光中心波长 ~1 048 nm。在最高输出功率为 4.702 W 时,光斑两个方向的光束质量因子 M^2 分别为 1.101 和 1.009,如图 5(c)所示;光斑形状如图 5(d), CCD 图表明输出光斑具有较好的高斯分布。该晶体的激光实验数据汇总于表 3。

此外,为探究水冷温度对实验的影响,采用 3# Yb: LuAG 单晶光纤在 940 nm 泵浦,输出镜透过率 10% 时,改变水冷温度,测量其输出激光功率及光-光转化效率。由图 6 可见,在水冷温度由 20 °C 降至 16 °C 时,输出功率随水冷温度降低而增加,但变化较小,与以往的报道相符^[18]。

μ -PD 法生长的 1# ~ 3# Yb: LuAG 单晶光纤均已实现激光输出。对比同直径的 2# 和 3# 单晶光纤的连续实验结果,可知 2# 单晶光纤由于直径波动较大 (~10.5%), 激光输出功率严重受限。3# (10%, $\Phi = 3$ mm, 直径波动 ~ 1%) 单晶光纤的激光输出功率 >4W, 且在水冷 16 ~ 20 °C 范围内,激

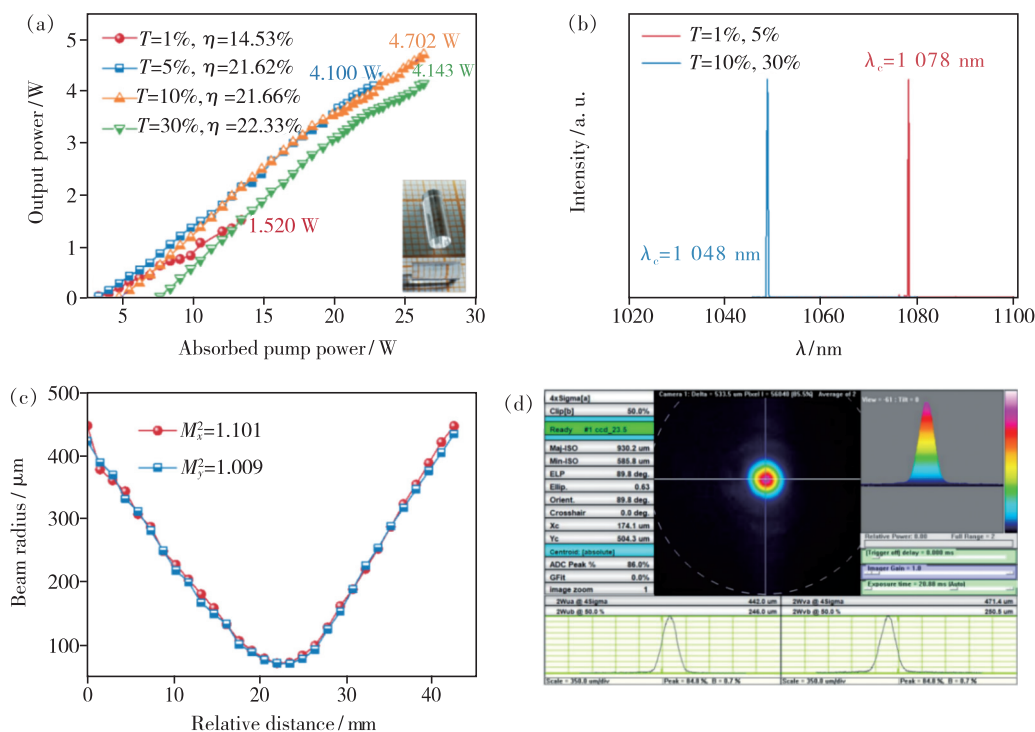


图 5 Yb: LuAG SCF 3# (10%, $\Phi = 3$ mm, 直径波动 ~ 1%) 在 940 nm 泵浦下输出功率与吸收泵浦功率的关系(插图为相应晶体的照片)(a)、输出光谱(b)、最高输出功率下的光束质量因子(c)、最高输出功率下的光斑(d)。

Fig. 5 The relationship between the output power and absorbed pump power(The inset is the photograph of the corresponding crystal) (a), output spectrum(b), beam quality factor at the highest output power(c) and spot shape at the highest output power(d) of 3# (10%, $\Phi = 3$ mm, diameter fluctuation ~ 1%) Yb: LuAG SCF under 940 nm pump.

表 3 Yb: LuAG SCF 3# 的连续激光输出结果

Tab. 3 The CW laser output of Yb: LuAG SCF 3#

泵浦源	$T/\%$	输出功率/W	斜效率/%	输出中心波长/nm
940 nm	1	1.520	14.53	~1 078
	5	4.100	21.62	~1 078
	10	4.702	21.66	~1 048
	30	4.143	22.33	~1 048

光输出功率随水冷温度降低而增大。此外,采用 940 nm 泵浦时,主要有 ~1 049 nm 和 ~1 078 nm

两种中心波长的激光输出。如图 7 所示,对于 Yb^{3+} 三能级体系,1 049 nm 的输出对应于 $^2\text{F}_{5/2}$ 最低能级至 $^2\text{F}_{7/2}$ 最高能级的跃迁。对于输出波长 1 078 nm 的研究相对较少,2004 年,GRIEBNER 等借助 $\text{Yb: Lu}_2\text{O}_3$ 实现了中心波长 1 080 nm 的锁模激光输出^[19];2014 年,BROWN 等表征了 $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 晶体的发射光谱,存在 ~1 078 nm 的发射峰^[6]。实验测得的 ~1 078 nm 的发射波长应该是 Yb^{3+} 掺杂材料的一个基本特性,然而对于 Yb: LuAG 单晶光纤 1 078 nm 的激光输出原理尚未有报道,还有待深入研究。

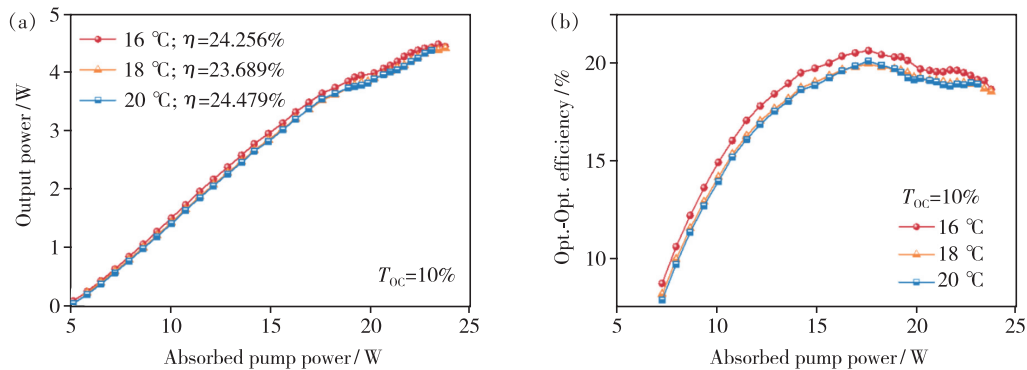


图 6 Yb: LuAG SCF 3# (10%, $\Phi = 3$ mm, 直径波动 ~1%) 在 940 nm 泵浦不同水冷温度下输出功率(a)、光-光转化效率(b)与吸收泵浦功率的关系。

Fig. 6 The relationship between output power(a), O-O conversion efficiency(b) and absorbed pump power of 3# (10%, $\Phi = 3$ mm, diameter fluctuation ~1%) Yb: LuAG SCF under 940 nm pump.

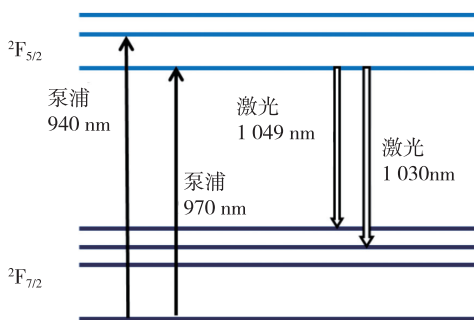


图 7 Yb^{3+} 的能级简图

Fig. 7 The energy level diagram of Yb^{3+}

单晶光纤结合了体块晶体和玻璃光纤的优势,理论上具有优异的激光性能。然而,由于单晶光纤激光测试设备的限制,只能将单晶光纤切割为长度 8 mm,增益长度较小,且单晶光纤端面未镀相应的增透膜,所以输出功率和斜效率较低。

3.2 MoTe_2 性能

二维过渡金属硫化物(TMDC)具有优异的光学和电学性能。 MoTe_2 作为常用的 TMDC,被广泛用作非线性光学可饱和吸收体材料。图 8(a)、(b)分别为实验中所用的 MoTe_2 在 0.2 ~ 2.5 μm 范围内的紫外-可见-近红外透过光谱和 1.28 ~ 10 μm 范围内的 FTIR 透射谱。结果表明,制备的 MoTe_2 样品在 0.2 ~ 7 μm 范围内无吸收峰,在 1 ~ 7 μm 内透过率 > 50%,展现出较好的线性光学性质。

开孔 Z 扫描测试实验结果如图 9 所示,拟合曲线是根据非线性光学理论对实验数据的拟合。 MoTe_2 沿光轴方向由远距离接近焦点位置时归一化透过率逐渐增大, MoTe_2 在 532 nm 和 1 064 nm 展现出优异的可饱和吸收现象,表明制备的可饱和吸收体 MoTe_2 具有优秀的非线性光学性质。

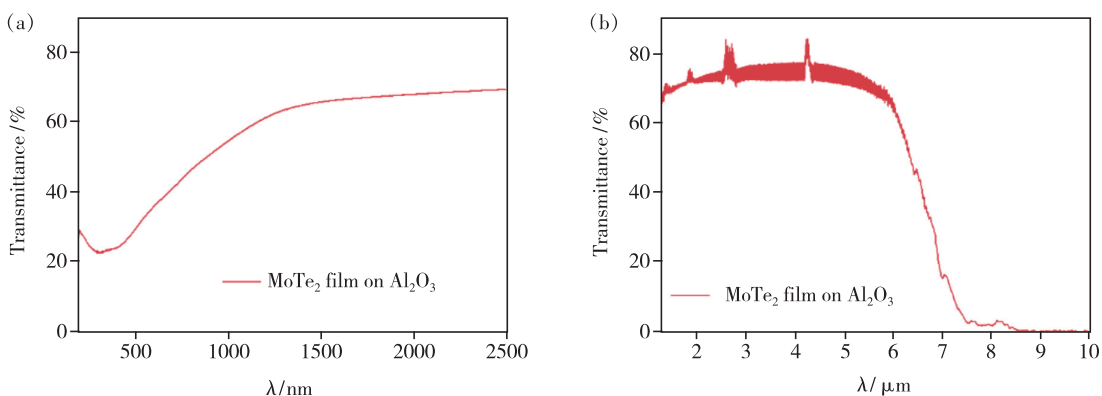


图 8 (a) MoTe₂ SA 在 0.2 ~ 2.5 μm 范围的紫外-可见-近红外光谱; (b) MoTe₂ SA 在 1.28 ~ 10 μm 范围的 FTIR 透射谱。
Fig. 8 (a) UV-Vis-NIR transmission spectrum of MoTe₂ SA in the range from 0.2 μm to 2.5 μm. (b) FTIR transmission spectrum of MoTe₂ SA in the range from 1.28 μm to 10 μm.

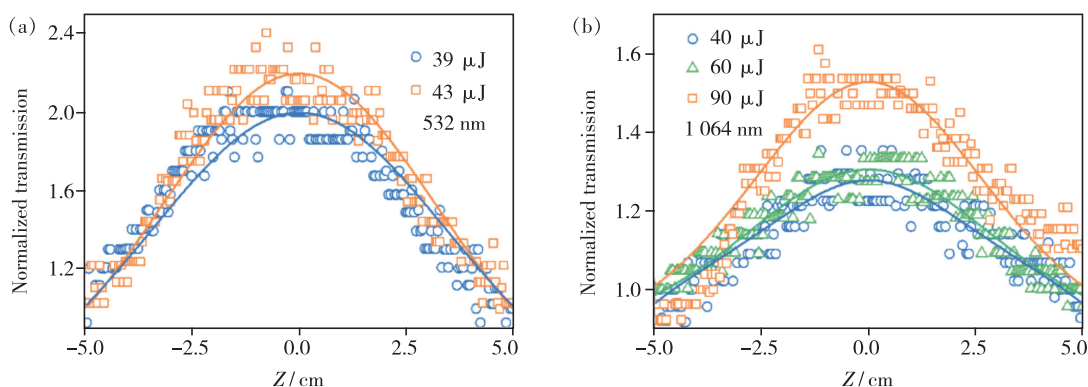


图 9 (a) MoTe₂ SA 在 532 nm 处的 Z 扫描数据和理论拟合; (b) MoTe₂ SA 在 1 064 nm 处的 Z 扫描数据和理论拟合。
Fig. 9 (a) Z-scan data and theoretical fitting of the MoTe₂ SA at 532 nm. (b) Z-scan data and theoretical fitting of the MoTe₂ SA at 1 064 nm.

3.3 基于 MoTe₂ 被动调 Q 的单晶光纤激光器

在 3# Yb:LuAG 单晶光纤 (10%, Φ = 3 mm) 获得了 4.703 W 连续激光输出的基础上, 以 MoTe₂ 作为可饱和吸收体, 获得了最高平均功率

为 0.522 W 的被动调 Q 脉冲激光输出, 实验结果如图 10 所示。图 10 (a) 为输出平均功率与吸收的泵浦功率关系图, 插图为输出功率最高时的激光 2D 光斑。图 10 (b) 为输出光谱图, 输出镜透

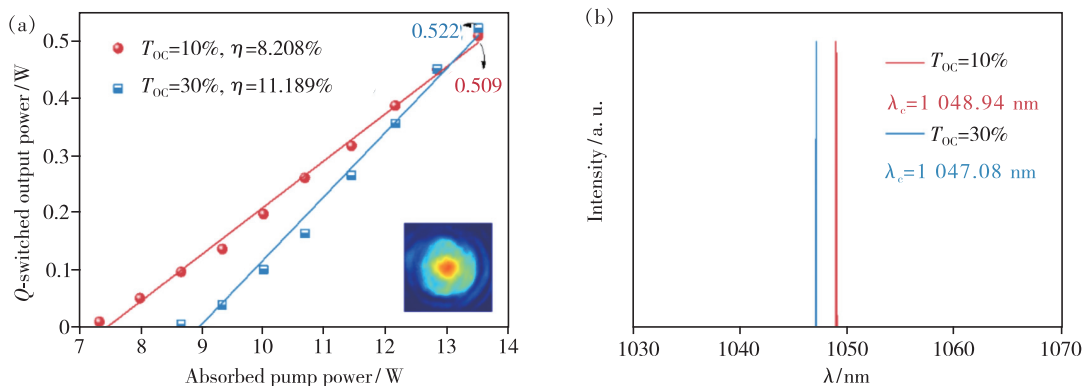


图 10 (a) 不同输出耦合镜下, 基于 MoTe₂ 被动调 Q Yb:LuAG 单晶光纤激光器的平均输出功率与吸收的泵浦功率关系和输出功率最高时的激光 2D 光斑 (插图); (b) 基于 MoTe₂ 被动调 Q Yb:LuAG 单晶光纤激光器的输出光谱。
Fig. 10 (a) Average output power versus the absorbed pump power and 2D beam profiles at the highest output power (insert) with different output couplers of Q-switched Yb:LuAG SCF laser using MoTe₂. (b) The output spectrum of the Q-switched Yb:LuAG SCF laser.

过率分别为 10% 和 30% 时,输出激光的中心波长分别为 1 048.94 nm 和 1 047.08 nm。图 11 为 $T = 10\%$ 时,基于 MoTe_2 调 Q 的 Yb: LuAG SCF 激光器在频率为 77.02 kHz 和 236.5 kHz 时的脉冲形状和脉冲序列。图 12(a)、(b) 分别显示了 $T = 10\%$ 时,脉冲持续时间、脉冲重复频率、脉冲能量和峰值功

率随吸收泵浦功率的变化。输出镜透过率 $T = 10\%$,当吸收泵浦功率为 10.67 W 时,输出平均功率为 0.261 W,此时对应最大单脉冲能量 3.39 μJ 。表 4 中总结了基于 MoTe_2 可饱和吸收体的 Yb³⁺ 掺杂被动调 Q 激光输出结果,本实验结果的峰值功率较小,但是具有相对较大的单脉冲能量。

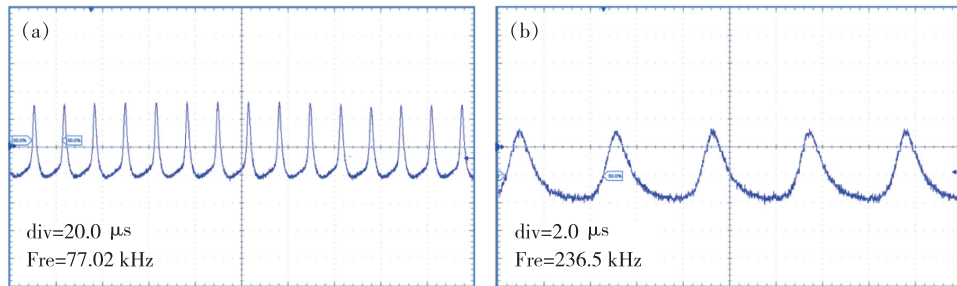


图 11 基于 MoTe_2 调 Q 的 Yb: LuAG SCF 激光器产生的时间脉冲形状和脉冲序列。(a) 频率为 77.02 kHz; (b) 频率为 236.5 kHz。

Fig. 11 Temporal pulse shapes and pulse trains generated from passively Q -switched Yb: LuAG SCF laser. (a) Frequency is 77.02 kHz. (b) Frequency is 236.5 kHz.

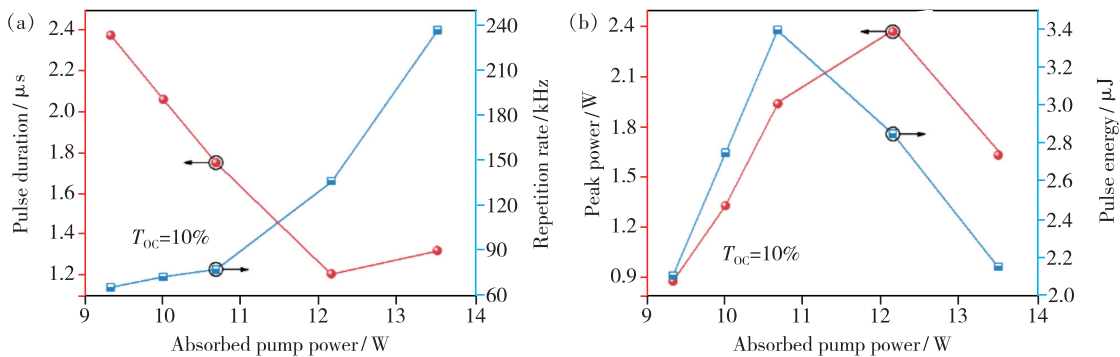


图 12 基于 MoTe_2 调 Q 的 Yb: LuAG SCF 激光器性能与吸收泵浦功率的关系。(a) 脉冲持续时间和脉冲重复频率; (b) 脉冲能量和峰值功率。

Fig. 12 Performance of the Q -switched Yb: LuAG SCF laser using MoTe_2 versus absorbed pump power. (a) Pulse durations and pulse repetition rates. (b) Pulse energies and peak powers.

表 4 基于 MoTe_2 SA 的 Yb³⁺ 掺杂被动调 Q 激光比较

Tab. 4 Comparison of Yb³⁺ doped passive Q -switched laser with MoTe_2 SA

增益介质	平均功率/W	重频/kHz	脉宽/ns	单脉冲能量/ μJ	峰值功率/W	Ref.
Yb: YCOB	1.58	700	52	2.25	40.8	[21]
Yb: KLuW	2.06	2 180	36	1.30	36.1	[22]
Yb: Lu _{0.74} Y _{0.23} La _{0.01} VO ₄	0.33	117	500	2.80	5.6	[23]
Yb: LaCOB	2.11	360	103	6.6	52.4	[24]
Yb: LuAG SCF	0.509	236.5	1 204	3.39	2.36	This work

4 结 论

本文采用 μ -PD 制备的 Yb: LuAG 单晶光纤

(SCF) 作为增益介质,获得了输出功率大于 4 W、斜效率 21.66%、光束质量因子 M^2 接近于 1 的连续激光输出。采用 940 nm 泵浦时,实现了

~1 049 nm 和 ~1 078 nm 两种中心波长的激光输出。并且在水冷 16 ~ 20 °C 范围内,激光输出功率随水冷温度降低而增大。

此外,在蓝宝石基底上制备了 MoTe₂ 并进行了线性和非线性光学性能表征。结果表明,MoTe₂ 样品在 0.2 ~ 7 μm 范围内无吸收峰,在 1 ~ 7 μm 内透射率 > 50%,展现出较好的线性光学性质;在 532 nm 和 1 064 nm 激光照射下,通过焦点位置附近时产生了饱和和吸收现象,表明制备的可饱和吸收体

MoTe₂ 具有优秀的非线性光学性质。基于该材料,进行了 Yb:LuAG 单晶光纤的被动调 Q 激光实验,最终获得最大单脉冲能量 3.39 μJ 的激光输出。本工作为 Yb:LuAG 单晶光纤在全固态高功率连续和脉冲激光器的应用提供了参考。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20210332>.

参 考 文 献:

- [1] BERA S, NIE C D, SOSKIND M G, *et al.* Optimizing alignment and growth of low-loss YAG single crystal fibers using laser heated pedestal growth technique [J]. *Appl. Opt.*, 2017, 56(35):9649-9655.
- [2] CAI Y Q, XU B, ZHANG Y S, *et al.* High power and energy generation in a Nd: YAG single-crystal fiber laser at 1 834 nm [J]. *Photonics Res.*, 2019, 7(2):162-166.
- [3] NIE C D, BERA S, HARRINGTON J A. Growth of single-crystal YAG fiber optics [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(14):15522-15527.
- [4] WANG J L, SONG Q S, SUN Y W, *et al.* High-performance Ho: YAG single-crystal fiber laser in-band pumped by a Tm-doped all-fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2019, 44(2):455-458.
- [5] WANG T, ZHANG J, ZHANG N, *et al.* The characteristics of high-quality Yb: YAG single crystal fibers grown by a LHPG method and the effects of their discoloration [J]. *RSC Adv.*, 2019, 9(39):22567-22575.
- [6] BROWN D C, MCMILLEN C D, MOORE C, *et al.* Spectral properties of hydrothermally-grown Nd: LuAG, Yb: LuAG, and Yb: Lu₂O₃ laser materials [J]. *J. Lumin.*, 2014, 148:26-32.
- [7] DONG J, UEDA K, KAMINSKII A A. Laser-diode pumped efficient Yb: LuAG microchip lasers oscillating at 1 030 and 1 047 nm [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, 7(10):726-733.
- [8] GE W Y, LIANG H X, MA J, *et al.* Wavelength-switchable mode-locked Yb: LuAG laser between 1 031 nm and 1 046 nm [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(3):2423-2428.
- [9] BEIL K, FREDRICH-THORNTON S T, TELLKAMP F, *et al.* Thermal and laser properties of Yb: LuAG for kW thin disk lasers [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(20):20712-20722.
- [10] DÉLEN X, PIEHLER S, DIDIERJEAN J, *et al.* 250 W single-crystal fiber Yb: YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(14):2898-2900.
- [11] WANG T, WANG H Y, ZHANG J, *et al.* Design and directional growth of (Mg_{1-x}Zn_x)(Al_{1-y}Cr_y)₂O₄ single-crystal fibers for high-sensitivity and high-temperature sensing based on lattice doping engineering and acoustic anisotropy [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(42):2103224.
- [12] LIU X F, GUO Q B, QIU J R. Emerging low-dimensional materials for nonlinear optics and ultrafast photonics [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(14):1605886-1-29.
- [13] LIANG Y Y, ZHAO J, QIAO W C, *et al.* Passively Q-switched Er: YAG laser at 1 645 nm utilizing a multilayer molybdenum ditelluride (MoTe₂) saturable absorber [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2018, 15(9):095801-1-5.
- [14] WANG M M, LI D W, LIU K, *et al.* Nonlinear optical imaging, precise layer thinning, and phase engineering in MoTe₂ with femtosecond laser [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(9):11169-11177.
- [15] YAN B Z, ZHANG B T, NIE H K, *et al.* High-power passively Q-switched 2.0 μm all-solid-state laser based on a MoTe₂ saturable absorber [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(14):18505-18512.
- [16] YAN Z Y, LI T, ZHAO S Z, *et al.* MoTe₂ saturable absorber for passively Q-switched Ho, Pr: LiLuF₄ laser at ~3 μm [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2018, 100:261-264.
- [17] WANG A Y, ZHANG J, YE S, *et al.* Optimized growth and laser application of Yb: LuAG single-crystal fibers by micro-

- pulling-down technique [J]. *Crystals*, 2021, 11(2):78-1-10.
- [18] KASAMATSU T, SEKITA H, KUWANO Y. Temperature dependence and optimization of 970-nm diode-pumped Yb: YAG and Yb: LuAG lasers [J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(24):5149-5153.
- [19] GRIEBNER U, PETROV V, PETERMANN K, *et al.* Passively mode-locked Yb: Lu₂O₃ laser [J]. *Opt. Express*, 2004, 12(14):3125-3130.
- [20] MA C Y, WANG C, GAO B, *et al.* Recent progress in ultrafast lasers based on 2D materials as a saturable absorber [J]. *Appl. Phys. Rev.*, 2019, 6(4):041304.
- [21] MA Y J, TIAN K, DOU X D, *et al.* Passive Q-switching induced by few-layer MoTe₂ in an Yb: YCOB microchip laser [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(19):25147-25155.
- [22] TIAN K, LI Y H, YANG J N, *et al.* Passively Q-switched Yb: KLu(WO₄)₂ laser with 2D MoTe₂ acting as saturable absorber [J]. *Appl. Phys. B*, 2019, 125(2):24-1-6.
- [23] LAN R J, ZHAO B, MU P H, *et al.* Passively Q-switched Yb: Lu_{0.74}Y_{0.23}La_{0.01}VO₄ laser based on MoTe₂ saturable absorber [J]. *IEEE Access*, 2019, 7:153378-153381.
- [24] LI Y H, XU Y F, XU G Y, *et al.* Performance of an Yb: LaCa₄O(BO₃)₃ crystal laser at 1.03 – 1.04 μm passively Q-switched with 2D MoTe₂ saturable absorber [J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2019, 99:167-171.



马晓斐(1997 -),女,山东泰安人,博士研究生,2019年于山东大学获得学士学位,主要从事单晶光纤光学表征和激光应用的研究。

E-mail: 17853143775@163.com



尹延如(1988 -),女,山东济南人,博士,实验师,硕士生导师,2017年于山东大学获得博士学位,主要从事人工功能晶体的生长及性能、采用提拉法、导模法开展功能晶体材料的设计与生长的研究。

E-mail: yyr@sdu.edu.cn



张健(1983 -),男,山东潍坊人,博士,副教授,博士生导师,2014年于德国拜罗伊特大学获得博士学位,主要从事晶体结构解析、微下拉法、激光加热基座法等方法生长单晶光纤以及基于同步辐射 X 射线衍射技术的晶体结构与相变的研究。

E-mail: jian.zhang@sdu.edu.cn