

109.5 W 输出 1.94 μm 波长 Tm:YAP 固体激光器

苑利钢,周寿桓,赵 鸿,陈 国,魏 磊,李 宝,王克强

(华北光电技术研究所 固体激光技术重点实验室,北京 100015)

摘 要:报道了一种高功率 Tm:YAP 激光器实验装置,采用 b 轴切割的 YAP/Tm:YAP/YAP 复合晶体作为激光增益介质,使用中心波长为 795 nm 的 LD 模块进行双端泵浦,当增益介质冷却温度为 20 $^{\circ}\text{C}$, LD 总泵浦功率为 301.4 W 时,获得了最高 109.5 W 的 1.94 μm 波长线偏振激光输出,光-光转换效率约为 36.3%,斜率效率约为 45.8%,在此输出功率条件下测得光束质量 M^2 因子为 3.8。

关键词: 1.94 μm 激光器; 端面泵浦; LD 泵浦; 高功率; Tm:YAP

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0405006

109.5 W output 1.94 micron Tm:YAP solid-state laser

Yuan Ligang, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Chen Guo, Wei Lei, Li Bao, Wang Keqiang

(Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: A high power Tm:YAP laser device was reported. The laser gain medium was b -axis-cut YAP/Tm:YAP/YAP composite crystal rod. By using a LD module with a center wavelength of 795 nm for double-end pumping, when the temperature of the cooling water was set at 20 $^{\circ}\text{C}$, and the total pump power was 301.4 W, the linear polarized laser output of 1.94 μm with a maximum of 109.5 W was obtained. The optical-to-optical conversion efficiency was up to 36.3% and the slope efficiency was about 45.8%, the measured beam quality of M^2 factor was 3.8 at the highest output power condition.

Key words: 1.94 μm laser; end-pumped; LD pump; high power; Tm:YAP

收稿日期: 2019-02-13; 修订日期: 2019-02-25

基金项目: 国家预先研究课题(51302010306)

作者简介: 苑利钢(1979-), 男, 博士生, 主要从事固体激光器方面的研究。Email: greenlaser@sina.com

导师简介: 周寿桓(1937-), 男, 中国工程院院士, 博士生导师, 主要从事固体激光方面的研究。Email: zfhuan@yahoo.com.cn

0 引言

1.94 μm 波段是水分子的重要吸收带,输出波长处于该波段的激光很容易被以水分子为主要组成部分的生物组织吸收,这也使得该波段范围的激光对生物组织的穿透力较弱,穿透深度浅,在激光治疗手术中可以使生物组织局部受热,能精确快速地切除坏死的人体组织,对外围组织附带损伤较小。同时,由于激光对人体组织特有的凝固效应,使得在手术中的出血量较小,因此,该波段激光光源在肿瘤切除手术、眼科手术、神经外科手术等医疗领域有着重要的应用价值,是一种理想的外科手术用光源。此外,1.94 μm 波段激光器另一个重要应用就是作为 Ho:YLF、Ho:YAP 等 2 μm 波段激光器的同带泵浦光源,国内外众多研究机构都在此领域开展相关工作^[1],然而,受限于固体激光增益介质材料性能和技术途径,目前该波段输出的固体激光器输出功率通常仅有数十瓦左右。

从 20 世纪 90 年代起,围绕如何提高该波段固体激光器的输出功率及效率,科学工作者从材料到器件,进行了全方位的研究探索,尤其是高功率半导体激光器(LD)的出现,促使科学工作者逐渐转向了以 LD 为抽运源,在提高功率、提升效率以及小型化等方面开展更深入的研究工作。

早在 1995 年,R.C.Stoneman 等人就建立了 Tm:YAP 激光器输出的理论模型,预测了激光输出波长随参数的变化,并据此设计了 1940 nm 波长的 Tm:YAP 激光器,采用输出波长 795 nm 的蓝宝石激光器作为泵浦源,实现了 350 mW 的功率输出,斜率效率为 43%^[2]。1997 年,Ian F.Elder 和 John Payne 采用长度 2 mm、掺杂浓度为 4.2%的 Tm:YAP 晶体,利用 LD 作为泵浦源,在室温下获得最高 730 mW 的连续激光功率输出,相对吸收功率的转换效率为 42%,波长位于 1965~2020 nm^[3]。2004 年,Amy C.Sullivan 等人采用 120 W 输出功率的光纤耦合 LD 作为泵浦光源,泵浦掺杂浓度为 3%的 Tm:YAP 晶体,采用 U 型谐振腔结构,当晶体温度冷却至 -10 $^{\circ}\text{C}$ 时,获得了最高 50 W 功率水平的连续激光输出,波长为 1940 nm,光束质量 4.7。采用声光 Q 开关进行调制,在调制频率 5 kHz 时,获得 7 mJ 单脉冲能量输出^[4]。2009 年,

王月珠等人采用 795 nm LD 作为泵浦,采用 *c* 轴切割 Tm:YAP 晶体(掺杂原子数浓度为 3at.%),在 26.2 W 泵浦功率下,实现了中心波长 1938.2 nm 的激光输出,功率达到 8.12 W,光-光转换效率为 31.0%,斜率效率为 52.1%^[5]。2011 年,Z.Zhan 等人采用 795 nm LD 偏振分光后,双端泵浦 *c* 轴切割 Tm:YAP 晶体,获得了功率 12.3 W、中心波长 1936 nm 的激光输出^[6]。2017 年,蔡军等人采用双端抽运 Tm:YAP 板条激光器方案,室温条件下,在抽运功率为 164.4 W 时,获得了最大功率 54.7 W 的连续激光输出,斜率效率为 44.2%,输出中心波长为 1938.8 nm^[7]。

综上,实现 Tm:YAP 激光器 1.94 μm 波段高效输出的主要技术方式为,采用中心波长 795 nm 的光纤耦合输出 LD 模块,端面泵浦方式。但是,由于采用端面泵浦方式,热量主要集中于晶体的端面,如果没有对端面进行高效的热处理,很容易导致晶体端面炸裂,或者由于严重的热畸变导致激光输出功率下降,光束质量变差。

1 Tm:YAP 晶体光谱特性分析

与 Tm:YAG 等掺 Tm³⁺离子基质材料相比,Tm:YAP 晶体具有较好的物理和化学性能,尤其是具有室温运行阈值较低和线偏振输出等特点。YAP 基质材料具有机械强度大、相对密度高、硬度高、导热好的优点,晶体透射光谱范围较宽(0.2~5.9 μm)。Tm:YAP 晶体为负双轴光学晶体,属于斜方晶系结构,两个光轴在 *ac* 平面上呈 70 $^{\circ}$ 夹角。Tm:YAP 晶体切割时沿不同轴向,会获得不同的峰值输出波长,采用 *b* 轴切割方式可以自然获得峰值位于 1.94 μm 波长的激光输出。Tm³⁺属准三能级系统,其能级结构如图 1 所示,在抽运光的激励下,Tm³⁺从 ³H₆ 激发到 ³H₄,经过自淬灭而跃迁至激光的上能级 ³F₄。与此同时,自淬灭过程产生的光子被 ³H₆ 的 Tm³⁺吸收而跃迁至 ³F₄,这一交叉弛豫的过程使得其量子效率接近于 2,从而大幅提升了泵浦光向激光转换的效率,并有效降低了阈值。Tm³⁺的掺杂原子数分数与交叉弛豫现象有着密切关系,淬灭过程源自 Tm³⁺激活离子间的相互作用而产生的能量转移,因此,如果 Tm³⁺离子掺杂浓度过低,自淬灭跃迁形成的交叉弛豫现象发生的几率就会大幅降低,为防止出现重吸收效应^[8],Tm³⁺

的掺杂浓度亦不能过高,掺杂浓度一般不应超过 10%。

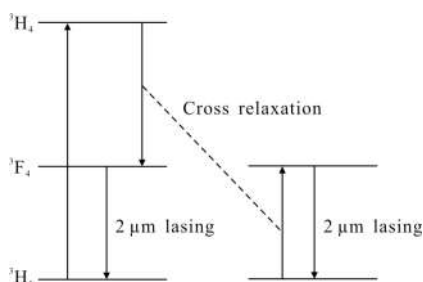


图 1 Tm³⁺离子能级结构与交叉弛豫

Fig.1 Energy level diagram and cross relaxation of the Tm³⁺ ion

Tm:YAP 晶体的吸收谱线如图 2 所示^[9],沿 *a*、*b*、*c* 轴三个不同轴向切割晶体的吸收系数有所不同,但是,吸收峰都位于 795 nm 波长附近,晶体掺杂浓度不同,吸收系数有所变化,但是吸收峰值波长保持不变。

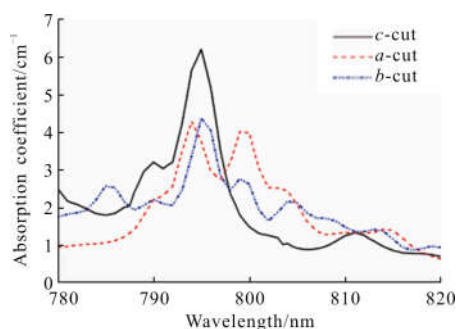


图 2 沿 *a*、*b*、*c* 轴切割的 Tm:YAP 晶体吸收光谱图

Fig.2 Absorption spectrum for the *a*, *b*, and *c*-cut Tm:YAP crystal

2 Tm:YAP 晶体散热与热分布模拟

2.1 Tm:YAP 晶体散热模块

激光晶体的散热模块是激光器的核心部件,其散热能力直接影响输出功率、输出效率等激光器的性能。由于采用端面泵浦方式,热量集中在晶体端面,尤其是 YAP 基质材料不同于 YAG,其属于各项异性晶体材料,沿各晶向方向具有不同的热膨胀系数,容易受张力影响而炸裂,因此,解决端面的高效散热问题是实现高功率激光输出的一个需要考虑的因素^[10]。在研究工作中,采用了传导和液体冷却相结合的方式,实现对晶体的高效散热和温控。

为了实现高效传热,设计并加工了如图 3 所示散热结构热沉模块,采用紫铜作为晶体热沉材料,晶

体热沉采用上下拼合方式,将晶体夹持于热沉中心,并沿晶体轴向平行、对称设计六个独立的水流通道,用于均匀对流置换热沉传导的热量。为了更为高效地实现水流与热沉间的热量交换,在每个独立通道内部都设计蜂窝式的水流通孔,目的是增加水流与热沉的换热面积,提高效率。其次,选用 0.1 mm 厚铜箔作为导热填充材料,采用高温熔接工艺将晶体与热沉熔接在一起,实现了晶体和热沉无缝焊接。

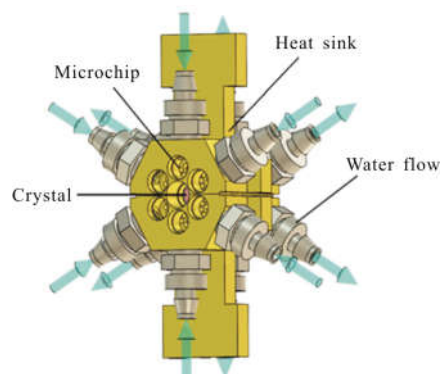


图 3 散热模块结构示意图

Fig.3 Structure of heat sink module

2.2 Tm:YAP 晶体热分布模拟

Tm:YAP 激光晶体内的热分布可以通过柱坐标下的热传输方程求解得到:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial T}{\partial z^2} = -\frac{Q(r, z)}{K_c} \quad (1)$$

晶体内部的热源分布类似于高斯分布:

$$Q(r, z) = \frac{2\alpha\xi p}{\pi\omega_p} \exp\left(-2\frac{r^2}{\omega_p^2} - \alpha z\right) \quad (2)$$

ξ 是热转换系数,代表晶体吸收泵浦能量而转换为晶体内部热负荷的比例,由量子亏损决定,在 Tm:YAP 激光器中,由于交叉弛豫现象的存在, $\xi=1-2\nu/\nu_p$, ν 与 ν_p 分别为激光和泵浦光的频率。将上两式进行代数变换后得到:

$$\Delta T(r, z) = T(r, z) - T(R, z) = \frac{\alpha\xi p \exp(-\alpha z)}{4\pi K_c} \times \left[\ln\left(\frac{R^2}{r^2}\right) + E\left(\frac{2R^2}{\omega_p^2}\right) + E\left(\frac{2r^2}{\omega_p^2}\right) \right] \quad (3)$$

式中: K_c 为热传导率; E 为幂积分函数。晶体边界温度取决于热沉温度,在明确热参数与泵浦光分布时,可以模拟计算分析出晶体内部的温度分布状况。使用 ANSYS 有限元热分析软件,对所采用的 Tm:YAP

晶体,在不同端面泵浦注入功率条件下的热分析进行模拟,所用到的参数如表 1 所示。

表 1 Tm:YAP 晶体热分析参数

Tab.1 Parameters on thermal analysis of Tm:YAP crystal

Parameters	Value
$k/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	11
α/cm^{-1}	2.8
ξ	0.22
$\omega_p/\mu m$	500
$c/J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$	0.4
$\rho/g \cdot cm^{-3}$	5.35
T/K	298

YAP/Tm:YAP/YAP 晶体和 Tm:YAP 晶体,复合晶体直径为 5 mm,长度为 30 mm,两端非掺杂区长度各 5 mm,掺杂浓度为 3.0%; Tm:YAP 晶体,直径为 5 mm,长度为 20 mm,掺杂浓度同样为 3.0%,由于不同 Tm^{3+} 掺杂浓度的 Tm:YAP 晶体吸收系数有着较大的差别^[1],而该参数对模拟结果影响较大,表 1 中吸收系数 α 为实际实验测量值。

采用 ANSYS 进行有限元热分析时,将晶体周边与热沉接触面温度设为恒定值,该温度值高于晶体热沉冷却水温度,通常情况下,晶体表面温度与冷却水温度差值小于 10 °C,模拟中取中间值 5 °C 将晶体表面设置为 25 °C(298 K)恒定值,晶体热沉冷却水温度为 20 °C。晶体的两个端面设置为空气自然对流散热。在 Tm:YAP 晶体双端总泵浦功率分别为 100、200、300 W 条件下,对晶体内部及表面温度分布进行了模拟计算,结果如图 4 所示。

在模拟分析计算中,所用激光晶体分别为复合

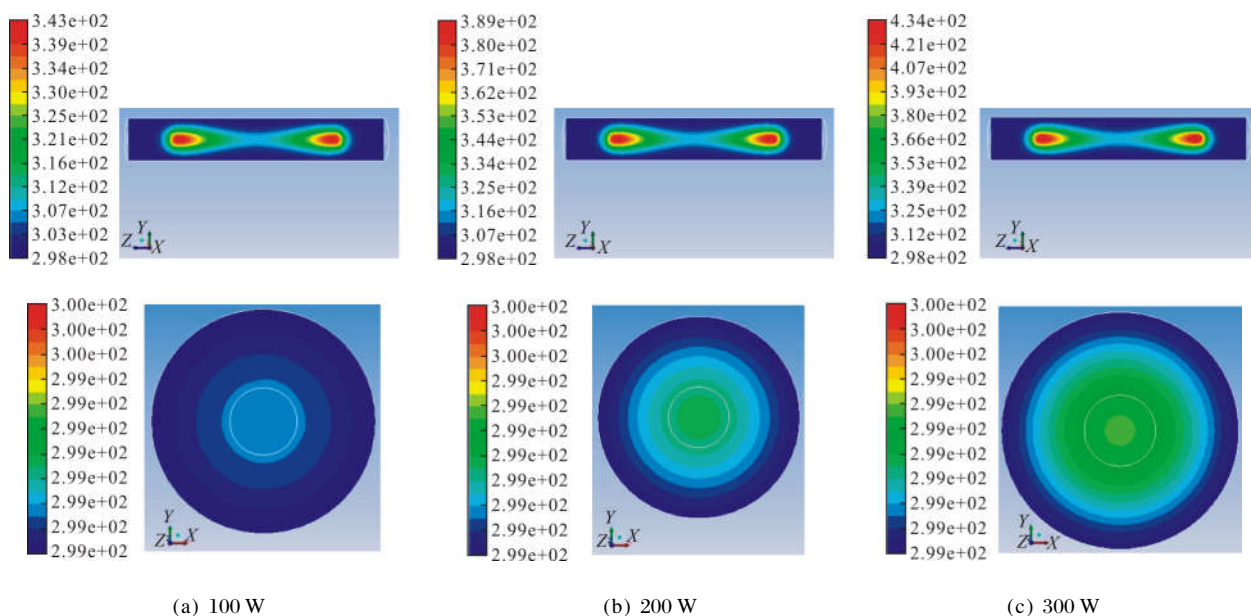


图 4 复合 YAP/Tm:YAP/YAP 晶体在不同泵浦功率下沿轴和端面热分布图

Fig.4 Heat distribution along the axis and end face of the composite YAP/Tm:YAP/YAP crystal at different pump powers

从模拟热分布图可以看出,晶体热量主要集中在掺杂区复合面附近,在 100、200、300 W 不同泵浦功率设定条件下,计算得到最高温度分别为 342.4、386.6、430.8 K,由于非掺杂区 YAP 晶体的原因,端面受热影响较小,在 300 W 泵浦功率条件下端面中心最高温度为 299.2 K,与晶体外侧表面仅有 1.2 K 的温差。

从 Tm:YAP 晶体模拟热分布图(图 5)可以看出,晶体热量同样集中于中心,但是与复合晶体不同的是,其最高温度点位于晶体端面中心,对于端面泵浦方式来说,这是易于理解的。在 100、200、300 W 不同设定泵浦功率条件下,计算得到最高温度分别为 356.1、414.0、471.9 K,分别比同等条件下复合晶体最高温度点高 13.7、27.4、41.1 K。

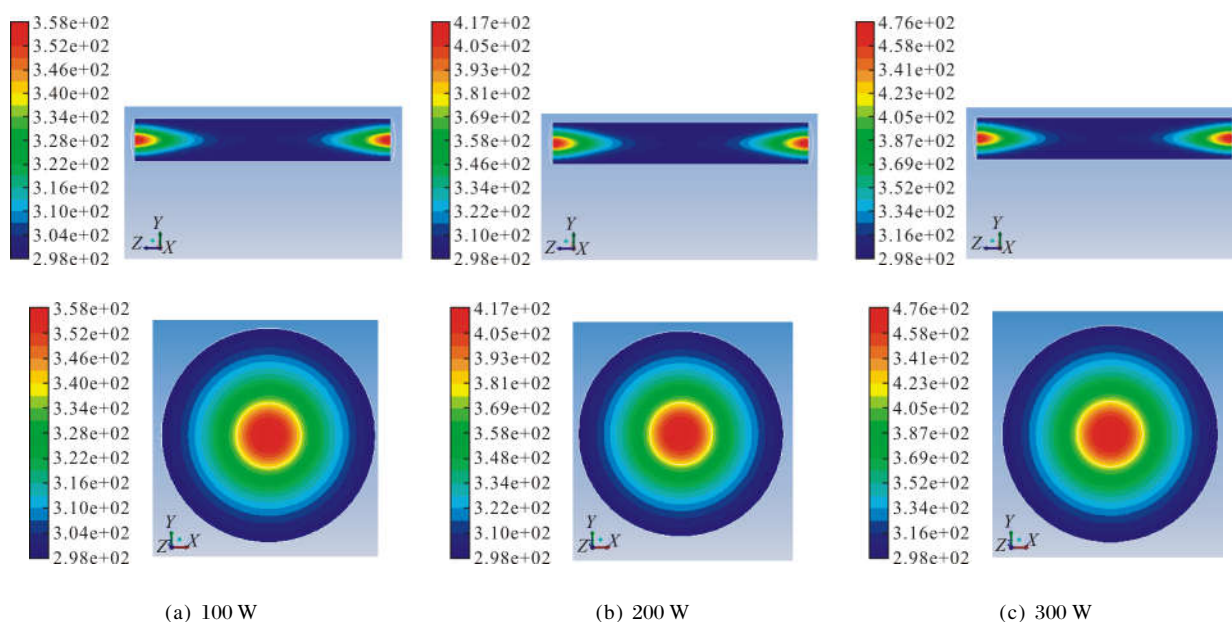


图 5 Tm:YAP 晶体在不同泵浦功率下沿轴和端面热分布图

Fig.5 Heat distribution along the axis and end face of the Tm:YAP crystal at different pump powers

晶体内的温度梯度会导致晶体折射率的变化,从而形成热透镜效应,导致激光输出效率降低,光束质量变差,当晶体内部温差达到晶体张力极限时,会导致晶体炸裂。对于 Tm:YAP 晶体,除热透镜效应外,由于热梯度集中于两个端面,会导致晶体的端面平面度产生物理畸变,导致光束质量的进一步劣化。

3 Tm:YAP 激光器实验装置

Tm:YAP 激光器的实验装置如图 6 所示,激光器谐振腔由 M_1 、 M_2 、 M_3 三个腔镜组成,总腔长为 120 mm,Tm:YAP 晶体中心距谐振腔后全反镜 M_3 为 60 mm。为了获得更高的激光输出功率,实验中采用双端泵浦方式,两个 LD 抽运源工作参数相同,额定输出功率均为 150 W (CW),LD 模块冷却温度为 20 °C 条件下,在最高输出功率时测得中心波长为 794.9 nm,这与 Tm:YAP 晶体的吸收峰较为匹配。LD 通过芯径为 400 μm 的光纤耦合输出,数值孔径 (NA) 为 0.22。光纤输出的泵浦光通过耦合比为 1:2.5 的光束耦合器进行准直,准直后注入 Tm:YAP 晶体端面的泵浦光斑直径约为 1.0 mm,这两束泵浦光分别通过 45° 平镜 M_2 和弯月形谐振腔镜 M_3 注入晶体中心。谐振腔输出镜 M_1 为弯月镜,曲率半径为 200 mm,凹面面向腔内,对 1.94 μm 的透过率 $T=20\%$, M_2 为平-平,表面镀有 795 nm 增透膜(透射率

$T>98\%$)和 2 μm 全反膜(45°角入射),弯月镜 M_3 为 Tm:YAP 激光器的谐振腔后全反镜,曲率半径同样为 200 mm,镀有 1.94 μm 全反膜(反射率大于 99.5%)和 795 nm 增透膜(透射率 $T>98\%$)。Tm:YAP 晶体为圆柱状结构,采用 b 轴切割, Tm^{3+} 的掺杂原子数百分比为 3.0%,晶体两端均镀有 795 nm 和 1.94 μm 波段的双增透膜。为了获得更高的输出效率,同时避免非工作状态 Tm:YAP 晶体端面结雾,将图 2 所示散热模块冷却水温度保持在 20 °C,冷却水的温控精度为 ± 0.1 °C。

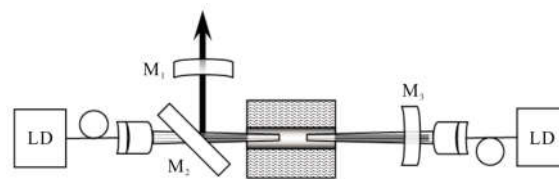


图 6 实验光路原理图

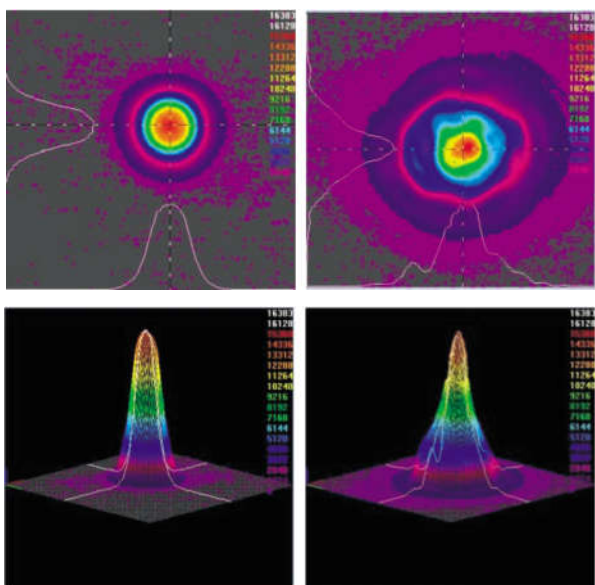
Fig.6 Schematic diagram of experimental device configuration

4 实验结果与讨论

在 Tm:YAP 激光器出光实验之前,首先开展了 Tm:YAP 晶体及复合 YAP/Tm:YAP/YAP 对 LD 泵浦光的吸收测试,在泵浦光单端注入条件下,注入功率从零增长至最高 150 W 期间,两种晶体对泵浦光吸收率始终维持在 98% 以上,最高剩余泵浦功率约

为 3 W。由于较高的掺杂浓度和较大的吸收截面, Tm:YAP 晶体对泵浦光具有很强的吸收,这也是开展双端泵浦实验,提升总泵浦功率,从而提升激光输出功率的一个重要前提。

在 Tm:YAP 激光器出光实验研究中,首先开展了 Tm:YAP 晶体的激光输出实验,随着 LD 注入功率的增长,激光输出功率线性增长,当双端总泵浦功率为 246.2 W 时,获得最高 73.5 W 的激光输出,光光转换效率 29.9%,斜率效率 36.2%。随着 LD 泵浦功率的进一步增加,输出功率并未随之增长,进一步增加泵浦功率出现激光输出功率下降现象。在最高输出功率条件下,采用 CCD 对近场输出光斑(距离输出镜约 100 mm)分布进行了测试,测得近场光斑分布如图 7 所示,从图中可以明显看出,随着激光输出功率由 20 W 提升至最高 73.5 W,光斑出现了较为严重的畸变。根据热模拟分析结果可以推测,随着注入功率的增加,晶体端面中心与边缘产生较大温差,形成了较为严重的热透镜效应和端面热畸变,导致振荡激光模体积减小,输出功率降低,光束质量劣化。



(a) 20 W

(b) 73.5 W

图 7 两种输出功率下测得近场光斑 2D 和 3D 分布图

Fig.7 Near-field distribution of 2D and 3D beam profiles measured at two different output powers

在最高输出功率条件下,采用两点法测得输出激光光束质量 M^2 因子约为 7.9。

为了进一步提升激光输出功率,并改善光束质量,在同等实验条件,开展了采用复合 YAP/Tm:YAP/YAP 晶体的激光输出实验,该晶体参数同热分析模拟中参数相同。实验中,输出功率随着泵浦功率的增长,在整个泵浦增加区间一直呈线性增长,其功率输出曲线如图 8 所示,在最高泵浦功率 301.4 W 时,获得最高输出功率为 109.5 W,光光转换效率约为 36.3%,斜率效率约为 45.8%。Tm:YAP 激光器属于准三能级激光系统,其转换效率和输出功率随晶体表面冷却温度的降低而升高,基于此,为了获得更高的转换效率和输出功率,应尽可能降低晶体表面冷却温度,然而冷却温度的降低使得晶体端面容易结雾,导致端面吸收损耗增加,激光输出功率下降,严重时造成晶体端面膜层损伤。因此,研究工作中,应综合考虑上述因素,选取适当的晶体冷却温度。

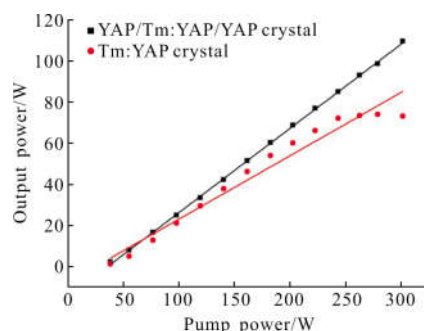


图 8 1.94 μm 激光输出功率曲线

Fig.8 Curve of 1.94 micron laser output power

采用光谱仪对输出激光光谱进行了测量,测得输出光谱如图 9 所示,峰值波长为 1937.5 nm,激光输出线宽约为 3.5 nm (FWHM)。通过拟合法测得最高输出功率下 M^2 因子为 3.8,如图 10 所示,相比于 Tm:YAP 晶体,输出光束质量有较大幅度提升。

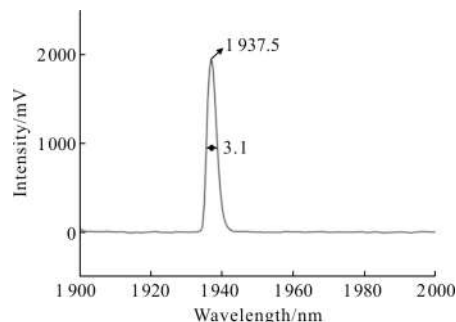


图 9 Tm:YAP 激光器输出光谱图

Fig.9 Output spectrum of Tm:YAP laser

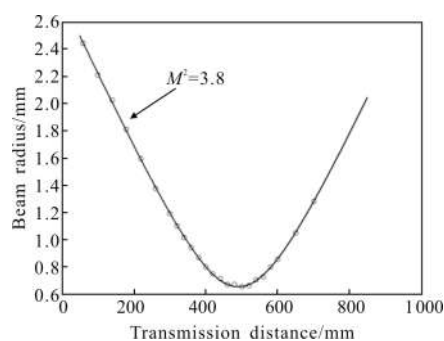


图 10 最高输出功率时测得的光束质量 M^2 因子

Fig.10 Beam quality M^2 factor under highest output power

对该条件下输出功率分别为 20 W、50 W 和最高输出功率 109.5 W 条件 F 的近场光斑(距离输出镜约 100 mm)分别如图 11 所示,从图中可以看出,激光近场分布随着注入和输出功率的增长,受端面热畸变的影响较小。

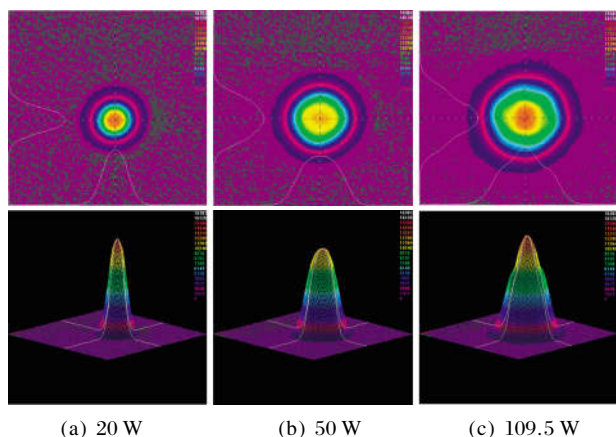


图 11 三种输出功率条件下测得近场光斑 2D 和 3D 分布图

Fig.11 Near-field distribution of 2D and 3D beam profiles measured at three different output powers

Tm:YAP 晶体具有各项异性的特性,采用该晶体可以直接获得线偏振激光输出,且偏振度较高,在实验中,在最高功率条件下,采用检偏器测得输出激光偏振度高于 99%。

5 结束语

设计并通过实验验证了一条实现百瓦级输出功率 1.94 μm 波长的固体激光器技术途径,采用复合的 YAP/Tm:YAP/YAP 晶体作为激光增益介质,中心波长为 795 nm 的带尾纤输出 LD 模块进行双端泵浦,使用高效的散热模块对激光晶体进行热处理,通过合理设计晶体参数和谐振腔,实现了最高 109.5 W、

中心波长为 1 937.5 nm 的激光输出,相应的光-光转换效率为 36.3%、斜率效率为 45.8%。模拟分析了复合 YAP/Tm:YAP/YAP 和 Tm:YAP 晶体在高功率端面泵浦条件下的热分布情况,并通过实验分析了同等条件下,使用两种晶体获得激光输出功率、输出效率等参数的差异,可以得出,在高功率端面泵浦条件下,采用复合晶体可以大幅降低端面吸热导致的热畸变和热透镜效应,这在较大程度上提升了激光器的输出功率、输出效率以及光束质量。受带尾纤耦合输出 LD 模块输出功率所限,更高输出功率的输出实验研究尚未进一步开展,但是,根据实验结果也可以看出,文中研究工作为实现更高功率 1.94 μm 波长的激光输出提供了一个有效的技术参考。

参考文献:

- [1] Xie Shengwen, Yang Cheng' ao, Huang Shushan, et al. Research progress of 2 μm GaSb -based high power semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0503003. (in Chinese)
谢圣文, 杨成奥, 黄书山, 等. 2 μm GaSb 基大功率半导体激光器研究进展[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(5): 0503003.
- [2] Stoneman R C, Esterowitz L. Efficient 1.94 μm Tm:YALO laser [J]. *Quantum Electron*, 1995, 1(1): 78-81.
- [3] Elder I F, Payne J. Diode-pumped, room-temperature Tm:YAP laser[J]. *Appl Opt*, 1997, 36(3): 8606-8610.
- [4] Sullivan A C, Wagner G J, Gwin D, et al. High power Q-switched Tm:YAlO₃ lasers [C]//Advanced Solid -State Photonics, OSA Technical Digest Optical Society of America, 2004: WA7.
- [5] Wang Yuezhu, Duan Xiaoming, Ke Liang, et al. Room temperature efficient continuous wave laser diode-end-pumped Tm:YAP laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1710-1713. (in Chinese)
王月珠, 段小明, 柯亮, 等. 室温下高效率连续波激光二极管端面抽运 Tm:YAP 激光器 [J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1710-1713.
- [6] Zhang Z, Ruan N J, Zhou F, et al. High power continuous wave Tm:YAP laser dual-end-pumped by laser diode at 795 nm [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(6): 1078-1080.
- [7] Cai Jun, Ding Yu. High power double-end-pumped Tm:YAP slab laser [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(2): 9-14. (in Chinese)
蔡军, 丁宇. 高功率双端抽运 Tm:YAP 板条激光器[J]. 光

- 电技术应用, 2017, 32(2): 9-14.
- [8] Wei Lei, Hu Xuehao, Han Long, et al. Laser Diode-dual-end-pumped Tm:YAP laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0502005. (in Chinese)
- 魏磊, 胡学浩, 韩隆, 等. 激光二极管双端抽运 Tm:YAP 激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502005.
- [9] Stoneman R C, Esterowitz L, Feldman B J. Efficient 1.94 μm Tm:YALO laser [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1995, 1(1): 78-81.
- [10] Li Yan, Zhang Yixuan, Na Quanxin, et al. Temperature distribution calculation and experiments of Tm:YLF laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0506001. (in Chinese)
- 李岩, 张艺轩, 纳全鑫, 等. Tm:YLF 激光器温度场分布计算与实验[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 0506001.
- [11] Lu Yanling, Wang Jun, Yang Yang, et al. Spectral properties of Tm:YAP laser crystal[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2006, 21(4): 838-842. (in Chinese)
- 陆燕玲, 王俊, 杨扬, 等. Tm:YAP 晶体生长及光谱特性研究[J]. 无机材料学报, 2006, 21(4): 838-842.