

2 μm 波段 Tm,Ho:YAlO₃ 激光器研究进展及展望

李林军^{1,2} 张治国^{1*} 白云峰² 杨曦凝³

¹哈尔滨工业大学理学院物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001

²黑龙江工程学院光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150050

³哈尔滨玻璃钢研究院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 2 μm 波段激光在医疗、环境监测、激光雷达、遥感探测、测距领域具有十分广阔的应用, 近年来成为中红外光源研究的热点。Tm,Ho:YAlO₃晶体具有较好的机械和热性能, 能实现多种2 μm 波段激光连续及脉冲输出。对国内外2 μm 波段Tm,Ho:YAlO₃激光器的研究进展进行了归纳与总结, 包括Tm/Ho单掺YAlO₃激光连续及脉冲振荡技术手段, Tm,Ho:YAlO₃激光连续及脉冲振荡技术手段, 高功率Tm,Ho:YAlO₃激光器研究的最新进展等。技术手段涉及主动调Q、被动调Q、Tm激光抽运Ho激光等, 并对Tm,Ho:YAlO₃激光器的进一步发展及应用给予了展望。

关键词 激光器; 2 μm 激光器; 连续波; 调Q模式; Tm,Ho:YAlO₃晶体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.070003

Progress and Prospect on Tm,Ho:YAlO₃ Laser at 2 μm Wavelength

Li Linjun^{1,2} Zhang Zhiguo¹ Bai Yunfeng² Yang Xining³

¹Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

²Institute of Optoelectronic Technology, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150050, China

³Harbin FRP Institute, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The laser of 2 μm waveband has attracted considerable interests as mid-IR light source, due to their extensive applications in laser medicine, environmental monitoring, laser lidar, remote sensing and laser ranging. Tm,Ho:YAlO₃ crystal with good mechanical and thermal properties has achieved multifold continuous and pulsed mode of 2 μm waveband lasers. The research and development on Tm,Ho:YAlO₃ laser at 2 μm waveband are classified and summarized, which include the techniques of continuous-wave and pulsed mode for Tm/Ho doped YAlO₃ and Tm, Ho:YAlO₃ laser output, and the latest development of high power Tm,Ho:YAlO₃ laser. The main techniques include active Q-switch, passive Q-switch and Ho laser pumped by Tm laser. The prospect and applications of Tm,Ho:YAlO₃ laser are discussed in the article.

Key words lasers; 2 μm lasers; continuous wave; Q-switch mode; Tm/Ho:YAlO₃ crystal

OCIS codes 140.3480; 140.3580; 140.3600

1 引言

由于具有处于人眼安全波段、大气透过性能好、水分子吸收系数大和可用于光纤传输等优点, 2 μm 波段激光在激光医疗、环境监测、激光雷达、遥感探测、激光测距等领域具有广阔的应用前景^[1-8]。目前, 产生2 μm 波段激光输出的激光器主要是固体激光器和光纤激光器, 但光纤激光器由于受到受激布里渊散射(SBS)和拉曼散射(SRS)的限制, 在不降低光束质量的条件下, 提高脉冲能量也有限, 因此固体激光器的脉冲激光在脉冲能量和峰值功率方面有优势。二极管激光器(LD)抽运Tm/Ho掺杂氧化物晶体的固体激光器是实现2 μm 波段激光输出的有效途径之一, 多年以来备受激光器研究者的青睐, 而寻求具有Tm/Ho离子掺杂浓度高、受激发射截面大、阈值功率低、机械性能好、偏振激光输出、适合LD抽运等特点的激光晶体一直是2 μm 固体激光技术领域的研究热点^[9-16]。

收稿日期: 2014-02-20; 收到修改稿日期: 2014-03-19; 网络出版日期: 2014-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(61378029)、中国博士后基金(20100481005, 201104422)

作者简介: 李林军(1978—), 男, 博士后, 主要从事激光光谱学和固态激光技术等方面的研究。E-mail: lilj2013@126.com

* 通信联系人。E-mail: zhangzhiguo@hit.edu.cn

近年来,由于晶体生长技术的改进,适合Tm/Ho掺杂的高质量、大尺寸的铝酸钇(YAlO₃)晶体在国内外多家研究机构被成功制备出来^[17-22]。YAlO₃(YAP)晶体是Y₂O₃-Al₂O₃系统中的另一个化合物,和YAG一样都属于正交晶系结构,因而具有良好的机械性能和材料结构各向异性^[23-25]。YAP晶体具有的双折射特性可抑制热致双折射。材料结构上的各向异性使YAP晶体受激发射截面也是各向异性,致使不同取向的Tm/Ho掺杂YAP晶体具有不同的激光功能、输出波长及运转形式^[23-26]。基于YAP晶体的诸多优势,国内外激光研究者开展了不同轴向的Tm:YAP、Tm,Ho:YAP、Ho:YAP晶体的光谱性能及激光性能的研究,取得了大量的研究成果^[27-33];相关研究成果表明,Tm:YAP晶体的受激发射截面是Tm:YAG晶体的2倍^[25],Tm:YAP晶体光谱和输出特性的研究结果证实其性能优于Tm:YAG和Tm:YLF晶体^[18,34],进一步证实Tm/Ho:YAP晶体是性能优良的激光晶体。

2 Tm,Ho:YAP激光器研究进展

Tm,Ho双掺激光属于准三能级或准四能级系统,上转换效应比较严重,通常采用低温制冷缓解激光晶体的热效应,多选用液氮作为制冷媒介。过去几年,在低温状态下,Tm,Ho:YAP激光器的研究和应用取得了突破性的进展^[28-29,35-40],基于振荡级块状单晶体不同轴向切割Tm,Ho:YAP激光器在连续模式及脉冲模式输出功率已经达到或接近10 W^[38-39],单频微片Tm,Ho:YAP激光器连续模式及脉冲模式输出功率也达到瓦量级^[41]。目前,国内外从事Tm,Ho:YAP激光器开发及研究的单位主要有德国康斯坦茨大学、德国汉堡大学、中国科学院上海硅酸盐研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所、山东大学、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、黑龙江工程学院等单位^[27-46]。

2.1 低温高功率Tm,Ho:YAP激光器

高功率Tm,Ho:YAP激光器无论是连续模式还是脉冲模式运转多采用振荡级直接输出的方式,即LD直接抽运Tm,Ho:YAP晶体,多选用中心输出波长为792~798 nm的LD作为抽运源,采用双端面抽运的方式,Tm,Ho:YAP晶体多采用液氮制冷^[28-29,35-37]。

2011年,黑龙江工程学院和哈尔滨工业大学联合报道了LD双端面抽运*c*轴切割单晶体Tm,Ho:YAP激光器情况,LD中心输出波长为794.8 nm,激光晶体尺寸为4 mm×4 mm×8 mm,激光晶体中Tm和Ho的原子数分数分别为5%和0.3%。实验原理图如图1所示^[38]。此激光器输出波长为2044 nm,其连续及脉冲模式输出功率均超过9.0 W;在重复频率为2.5 kHz时,激光器输出单脉冲能量为3.54 mJ,最窄脉冲宽度为47 ns。

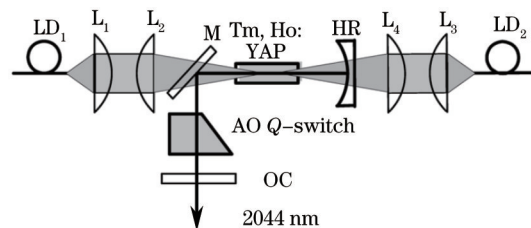


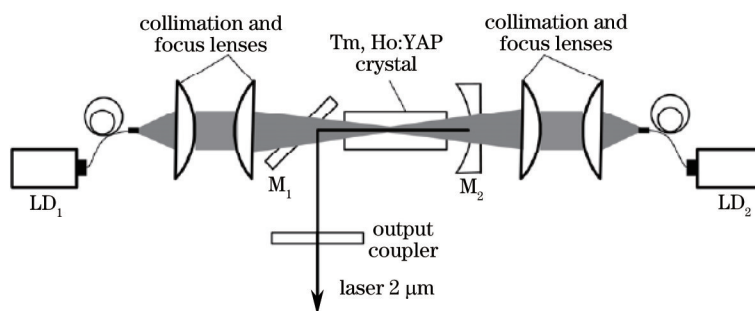
图1 高功率Tm,Ho:YAP激光器实验装置图

Fig.1 Experimental setup of high power Tm, Ho:YAP laser

同年,黑龙江工程学院和哈尔滨工业大学又联合报道了LD双端面抽运*b*轴切割单晶体Tm,Ho:YAP激光器情况,LD中心输出波长为794.2 nm,激光晶体尺寸为4 mm×4 mm×10 mm,激光晶体中Tm和Ho的原子数分数分别为5%和0.3%,实验原理图类似图1^[39]。此激光器输出波长为2.12 μm,其连续及脉冲模式输出功率均超过8.0 W;在重复频率为2.5 kHz时,激光器输出单脉冲能量为3.032 mJ,最窄脉冲宽度为32 ns。

2013年,黑龙江工程学院和哈尔滨工业大学联合报道了LD双端面抽运*b*轴切割单晶体Tm,Ho:YAP激光器情况,LD中心输出波长分别为794.1 nm和794.0 nm,激光晶体尺寸为4 mm×4 mm×8 mm,激光晶体中Tm和Ho的原子数分数分别为5%和0.3%,实验原理图如图2所示^[40]。此激光器输出波长为2.12 μm,其连续模式输出功率高达15 W。

此项技术是近年来研究高功率Tm,Ho:YAP激光器常采用的技术,采用该技术能够有效地缓解激光晶体的热效应,增加注入激光晶体中抽运功率,进而提高抽运光的转换效率。

图2 双LD抽运 *b*轴切割 Tm, Ho:YAP 激光器示意图Fig.2 Geometry of a *b*-cut Tm, Ho:YAP laser end pumped by two LDs

2.2 常温 Tm, Ho:YAP 激光器

常温 Tm, Ho:YAP 激光器, 在 *a*、*b*、*c* 三个轴向切割的 Tm, Ho:YAP 晶体都实现了激光输出, 激光器谐振腔种类比较丰富, 有直腔也有折叠腔, 激光多实现单频输出, 激光的光束质量好^[42-43]。

2011年, 哈尔滨工业大学姚宝权等^[44-45]先后报道了 *c* 轴切割 Tm, Ho:YAP 单频直腔激光器。该课题组报道了双 F-P 标准具选单频的 Tm, Ho:YAP 激光器, 实验中选用中心输出波长为 792 nm 的 LD 作为抽运源, 激光晶体的尺寸为 4 mm×4 mm×6 mm, 激光晶体中 Tm 和 Ho 的原子数分数为 5% 和 0.3%, 实验原理图如图 3 所示^[45]; 实验中获得了 2102.45~2102.54 nm 和 2130.72~2130.82 nm 两个波长范围内的单频的激光输出, 输出功率分别为 72.6 mW 和 42 mW。在 Laser Physics 杂志上, 该课题组报道了微片选单频 Tm, Ho:YAP 激光器, 实验中选用中心输出波长为 791.7 nm 的 LD 作为抽运源, 激光晶体的尺寸为 4 mm×4 mm×1 mm, 激光晶体中 Tm 和 Ho 的原子数分数分别为 5% 和 0.3%, 实验原理图如图 4 所示^[45]; 实验中获得了 216 mW 的激光输出, 相应的斜率效率为 13.6%。

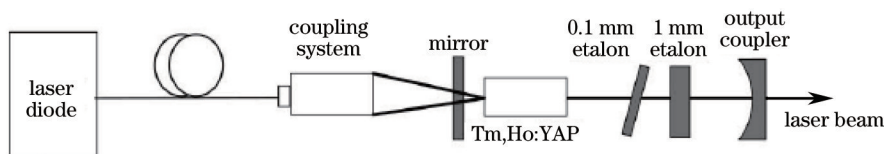


图3 双 F-P 标准具 Tm, Ho:YAP 激光器实验装置图

Fig.3 Experimental setup of the Tm, Ho:YAP laser with double F-P etalons

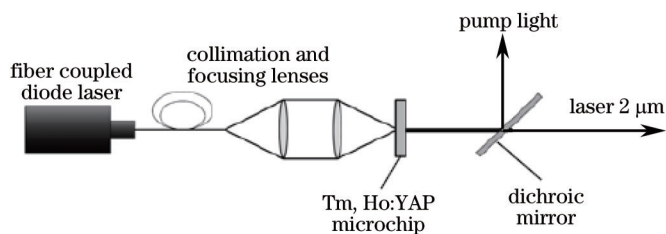


图4 Tm, Ho:YAP 微片激光器实验装置图

Fig.4 Experimental setup of the Tm, Ho:YAP microchip laser

同年, 德国康斯坦茨大学、德国汉堡大学、山东大学、中国科学院上海硅酸盐研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所等单位联合报道了 *a* 轴切割和 *b* 轴切割 Tm, Ho:YAP 激光器比较研究的结果情况, 实验原理图如图 5 所示^[43]。此实验中, *a* 轴切割 Tm, Ho:YAP 激光器的输出波长为 2119 nm, 相应的输出功率为 890 mW; *b* 轴切割 Tm, Ho:YAP 激光器的输出波长为 2103 nm, 相应的输出功率为 946 mW。

2013年, 德国康斯坦茨大学、山东大学、中国科学院上海硅酸盐研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所联合报道了 *b* 轴切割锁模 Tm, Ho:YAP 激光器情况, LD 中心输出波长在 726~859 nm 间可调, 激光晶体尺寸为 4 mm×4 mm×8 mm, 激光晶体 Tm 和 Ho 的原子数分数分别为 5% 和 0.3%, 实验原理图如图 6 所示^[46]; 此激光器输出波长在 2.1 μm 附近, 在输出波长为 2064.5 nm 时, 最窄的脉冲宽度为 40.4 ps, 激光器的输出功率为 132 mW。

在常温状态下, Tm, Ho:YAP 激光器进行单频或锁模研究是一个趋势, 而且也凸显 Tm, Ho:YAP 晶体在

常温 $2\ \mu\text{m}$ 波段研究的多样性、实用性。

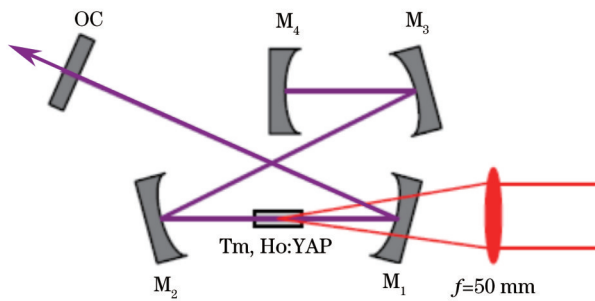


图5 连续波运转 Tm, Ho:YAP 激光器示意装置图
Fig.5 Schematic setup of continuous wave operation
Tm, Ho:YAP laser

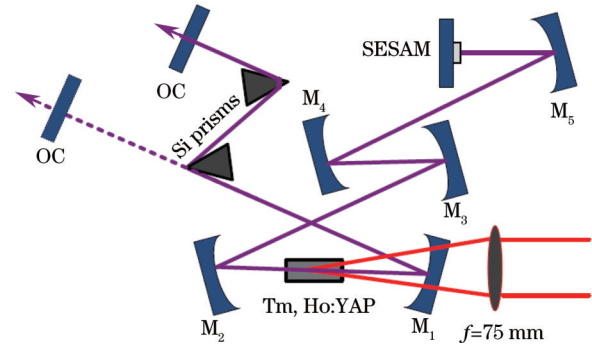


图6 锁模 Tm, Ho:YAP 激光器示意装置图
Fig.6. Schematic setup of mode-locked Tm,
Ho:YAP laser

3 Tm 激光抽运 Ho:YAP 激光器研究进展

为了实现常温状态下 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光连续及脉冲模式高功率输出,国内外专家开始不断探索新的技术,采用 Tm 激光抽运 Ho 激光是实现常温 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光连续及脉冲模式高功率输出的有效途径之一。因而,寻找合适的 Tm/Ho 单掺激光晶体实现高效、高光束质量、高功率激光成为 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光研究的热点。YAP 基质自身具有大量的优点,对其掺杂 Ho 离子作为激光增益介质实现 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光输出的研究出现了大量的报道^[21-22,26,47-48]。

Tm 激光抽运 Ho:YAP 激光的研究可以分为两个阶段, Ho:YAP 晶体基础研究阶段和 Ho:YAP 激光器高功率输出阶段。Ho:YAP 晶体基础研究阶段开始较早,20 世纪 70 年代 Weber 等^[26]就报道了 YAP 基质掺杂 Ho 离子激光输出的能级分裂及能级跃迁情况,1999 年 Malinowski 等^[21]详细地报道了 Ho:YAP 晶体的上转换情况及各分裂能级的能量值,2009 年 Dong 等^[22]详细报道了 Ho:YAP 晶体在 $2\ \mu\text{m}$ 波段的偏振特性及有效的唯象强度参数、荧光寿命、受激发射截面等参量。Ho:YAP 激光器高功率输出阶段研究开始相对较晚,2008 年哈尔滨工业大学 Yao 等^[47]报道了超过 5 W 的连续及脉冲模式运转的 Ho:YAP 激光器情况,实验中选用输出波长为 $1.91\ \mu\text{m}$ 的 Tm:YLF 激光器抽运 Ho:YAP 晶体, Ho:YAP 晶体尺寸为 $4\ \text{mm} \times 4\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$, Ho:YAP 激光晶体的 Ho 原子数分数为 1%,实验原理图如图 7 所示;此激光器的输出波长为 $2118\ \text{nm}$,最高单脉冲能量为 $1\ \text{mJ}$,最窄的脉冲宽度为 $24.5\ \text{ns}$,激光器的光束质量因子 M^2 约为 1.1。

近年来, Tm 激光抽运 Ho:YAP 激光器在向高功率方向发展的同时^[47],也开始向锁模锁频方向发展。

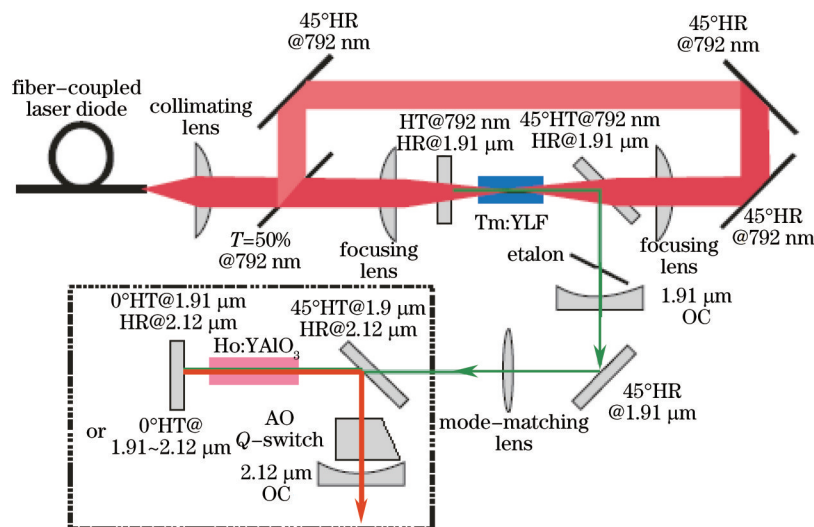


图7 Tm:YLF 激光器抽运 Ho:YAP 激光器结构示意图
Fig.7 Schematic diagram of a Ho:YAP laser pumped by a Tm:YLF laser

4 Tm:YAP 激光器研究进展

Tm:YAP 激光器 20 世纪 90 年代开始一直是国内外研究的热点。近年来,由于调 Q 技术的进步和 Tm:YAP 晶体生长技术的不断成熟,Tm:YAP 激光器不但实现了高功率的连续模式输出而且实现了高功率的调 Q 模式输出^[49-51]。

4.1 Tm:YAP 激光器连续模式输出

为了寻找合适 Tm 激光来抽运 Ho 激光,进而实现高功率常温运转 2 μm 波段连续及脉冲激光,国内外的激光专家不断探索新的激光晶体。

Tm:YAP 由于具有各向异性、自然双折射等优点备受国内外激光专家的青睐,相关 Tm:YAP 激光器连续模式运转文献报道较多,典型的报道如下。1998 年,英国著名学者 Elder 等^[52]报道了连续 Tm:YAP 激光器的基础研究,在实验中激光输出波长覆盖范围在 1.965~2.020 μm ,激光器最高输出功率为 730 mW。2006 年,捷克技术大学报道了 *a* 轴切割 Tm:YAP 激光器连续运转的情况,激光晶体长 3 mm,激光晶体的掺杂的 Tm 原子数分数为 4%,实验原理图如图 8 所示^[53];该报道中激光器实现了波长宽幅可调谐,LD 中心输出波长在 789~793 nm 内可调,最高抽运功率为 17 W,最高输出功率为 4.8 W。

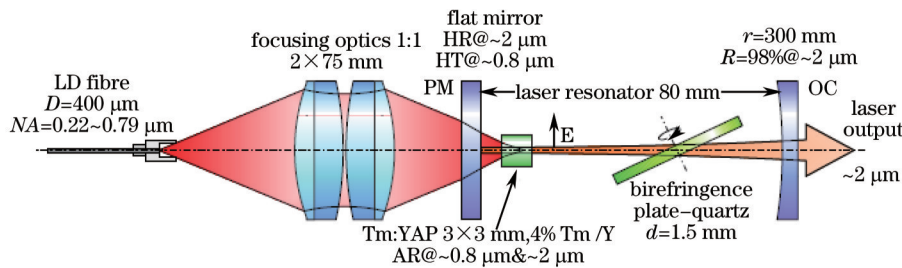


图 8 纵向 LD 抽运可调谐 Tm, Ho:YAP 激光器

Fig.8 Longitudinally diode pumped tuned Tm:YAP laser

2000 年以后,随着 Tm:YAP 晶体生长技术的成熟、晶体质量的不断提高、激光技术的不断提高,Tm:YAP 激光器连续输出超过了 50 W^[51]。

4.2 Tm:YAP 激光器脉冲模式输出

随着 Tm:YAP 晶体质量的不断改进以及调 Q 技术的不断成熟,LD 抽运单掺 Tm 晶体的脉冲激光得以实现。2004 年 Sullivan 等^[51]报道了高功率调 Q 模式运转的 Tm:YAP 激光器情况,实验中选用 LD 中心输出波长为 795 nm,激光晶体的掺杂的 Tm 原子数分数为 3%,实验原理图如图 8 所示;该 Tm:YAP 激光器输出波长为 1940 nm,调 Q 模式输出平均功率为 45 W,最大单脉冲能量为 7 mJ,最窄脉冲宽度为 73 ns。

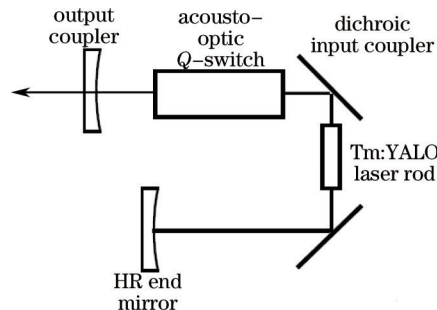


图 9 高功率调 Q 模式 Tm:YAP 激光器实验原理图

Fig.9 Schematic setup of the high power Q-switched Tm:YAP laser

5 结束语

目前,国内学者对 Tm/Ho:YAP 激光器在 2 μm 波段的研究主要在两大方面:1) 实现高功率输出,2) 实现超短超快的锁模锁频技术。LD 抽运 Tm, Ho:YAP 激光器在连续及脉冲实现了多种波长 2 μm 波段高功率激光输出,且 *b* 轴切割连续运转单晶体 Tm, Ho:YAP 激光器实现了超过 15 W 的功率输出^[40],但是单晶体脉冲运转 Tm, Ho:YAP 激光器超过 10 W 的平均输出功率鲜见文献报道。Tm 激光抽运 Ho:YAP 激光器可以在常温

状态下实现 2 μm 波段高功率连续及脉冲运转激光输出, LD 抽运 Tm, Ho:YAP 晶体实现 2 μm 波段高功率激光输出需在低温下运转, 因此 Tm 激光抽运 Ho:YAP 激光器实用性强。Tm:YAP 激光器输出波长多在 2 μm 以下^[49-53], 应用范围受限, 其较高的输出功率多用来作为 Ho 激光器的抽运源。

随着科学研究的需要, 2 μm 波段超短超快光源需求极为迫切, Tm, Ho:YAP 晶体质量越来越成熟, 近年来对 Tm, Ho:YAP 晶体进行锁模锁频技术研究越来越迫切, 相关研究不断见诸报道^[46]。比较 Tm, Ho:YAP 在 2 μm 波段的发展历程, 越来越多的学者倾向于锁模锁频技术研究。

参考文献

- 1 X M Duan, B Q Yao, Y J Zhang, *et al.*. Diode-pumped high efficient Tm:YLF laser output at 1908 nm with near-diffraction limited beam quality[J]. *Laser Phys Lett*, 2008, 5(5): 347-349.
- 2 Wei Xingbin, Peng Yuefeng, Wang Weimin, *et al.*. 2 μm pulsed laser with 100 mJ intracavity KTP optical parametric oscillator[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(11): 2762-2765.
魏星斌, 彭跃峰, 王卫民, 等. 百毫焦腔内 KTP 光参量振荡 2 μm 脉冲激光器[J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2762-2765.
- 3 Wang Pu, Liu Jiang. Progress and prospect on ultrafast Tm-doped fiber laser at 2 μm wavelength[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0601002.
王 璞, 刘 江. 2.0 μm 掺铥超短脉冲光纤激光器研究进展及展望[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0601002.
- 4 Fan Fengying, Song Zengyun. Measurement of CO₂ concentration with tunable diode laser absorption spectroscopy near 2 μm [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0215002.
范凤英, 宋增云. 2 μm 附近二极管激光吸收光谱 CO₂ 浓度测量研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0215002.
- 5 Wei Lei, Xiao Lei, Han Long, *et al.*. ZGP optical parametric oscillator pumped by Tm:YAP laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0702006.
魏 磊, 肖 磊, 韩 隆, 等. Tm:YAP 激光抽运 ZGP 晶体光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0702006.
- 6 Liu Jiang, Wang Pu. High-power passively mode-locked thulium-doped femtosecond fiber laser at 2.0 μm [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0902001.
刘 江, 王 璞. 高功率被动锁模 2.0 μm 掺铥飞秒脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0902001.
- 7 Liu Jiang, Wang Pu. Thulium-doped all-fiber broadband super fluorescent source at 2 μm wavelength[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0202006.
刘 江, 王 璞. 掺铥全光纤结构 2.0 μm 波段宽带超荧光光源[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0202006.
- 8 M Schellhorn. Performance of a Ho:YAG thin-disc laser pumped by a diode-pumped 1.9 μm thulium laser[J]. *Appl Phys B*, 2006, 85(4): 549-552.
- 9 Zhang C H, Yao B Q, Li G, *et al.*. 2041.3 nm/2054.6 nm simultaneous dual-wavelength single-longitudinal-mode Tm, Ho:YVO₄ microchip laser[J]. *Laser Phys*, 2010, 20(7): 1564-1567.
- 10 A A Lagatsky, X Han, M D Serrano, *et al.*. Femtosecond (191 fs) NaY(WO₄)₂ Tm, Ho-codoped laser at 2060 nm[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(18): 3027-3029.
- 11 Xinlu Zhang, Long Yu, Su Zhang, *et al.*. Diode-pumped continuous wave and passively Q-switched Tm, Ho:LLF laser at 2 μm [J]. *Opt Express*, 2013, 21(10): 12629-12634.
- 12 L J Li, B Q Yao, Y F Bai, *et al.*. CW and AO Q-switched operation of a dual-crystal Tm, Ho:GdVO₄ laser pumped by two diodes[J]. *Laser Phys*, 2013, 23(2): 025802.
- 13 Xiaojin Cheng, Shuaiyi Zhang, Jianqiu Xu, *et al.*. High-power diode-end-pumped Tm:LiLuF₄ slab lasers[J]. *Opt Express*, 2009, 17(17): 14895-14901.
- 14 X L Zhang, L Yu, S Zhang, J Q Zhao, *et al.*. Passively Q-switched Tm, Ho:LuLiF₄ laser with near constant pulse energy and duration[J]. *Appl Phys B*, 2013, 111(2): 165-168.
- 15 V Jambunathana, X Mateosa, M C Pujola, *et al.*. Diode-pumped continuous-wave laser operation of co-doped (Ho, Tm):KLu(WO₄)₂ monoclinic crystal[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 54(30): 326-328.
- 16 Yanqiu Du, Baoquan Yao, Xiaoming Duan, *et al.*. Cr:ZnS saturable absorber passively Q-switched Tm, Ho:GdVO₄ laser [J]. *Opt Express*, 2013, 21(22): 26506-26512.
- 17 Li Tao, Zhao Guangjun, He Xiaoming, *et al.*. Study on the color change of YAP crystals[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2002, 31(5): 456-459.

- 李 涛, 赵广军, 何晓明, 等. YAP 晶体变色现象的研究[J]. 人工晶体学报, 2002, 31(5): 456-459.
- 18 Lu Yanling, Wang Jun, Yang Yang, *et al.*. Study on Tm:YAP crystal growth and spectral characteristic[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2006, 21(4): 838-842.
- 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.
- 19 Yang Yang, Lu Yanling, Wang Jun, *et al.*. Study on the defects of 2 μm waveband laser crystal Tm:YAP[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2007, 36(2): 114-118.
- 杨 扬, 陆燕玲, 王 俊, 等. 2 μm 波段激光晶体 Tm:YAP 的生长缺陷[J]. 人工晶体学报, 2007, 36(2): 114-118.
- 20 Hamit Kalaycioglu, Alphan Sennaroglu, Adnan Kurt. Influence of doping concentration on the power performance of diode-pumped continuous-wave Tm³⁺:YAlO₃ lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 667-673.
- 21 M Malinowski, R Piramidowicz, Z Frukacz, *et al.*. Spectroscopy and upconversion processes in YAlO₃:Ho³⁺ crystals[J]. Optical Materials, 1999, 12(4): 409-423.
- 22 Qin Dong, Guangjun Zhao, Dunhua Cao, *et al.*. Polarized spectral analysis of Ho³⁺ ions in biaxial YAlO₃ crystal for 2 μm lasers[J]. J Phys D: Appl Phys, 2009, 42(4): 045114.
- 23 B Dischler, H Ennen. Polarized anisotropic photoluminescence of laser-related transitions in YAlO₃:Nd and YAlO₃:Er and line broadening by resonant lattice phonons [J]. J Appl Phys, 1986, 60(1): 376-382.
- 24 M J Weber, M Bass, K Andringa, *et al.*. Czochralski growth and properties of YAlO₃ laser crystals[J]. Appl Phys Lett, 1969, 15(10): 342 - 345.
- 25 I F Elder, M J P Payne. YAP versus YAG as a diode-pumped host for thulium[J]. Opt Commun, 1998, 148(4-6): 265-269.
- 26 Marvin J Weber, Michael Bass, Thomas E Varitimos, *et al.*. Laser action from Ho³⁺, Er³⁺, and Tm³⁺ in YAlO₃[J]. IEEE J Quantum Electron, 1973, QE-9(11): 1079-1086.
- 27 X Cheng, F Chen, G Zhao, *et al.*. High-efficiency, high-power, diode-pumped continuous-wave Tm:YAlO₃ slab lasers [J]. Appl Phys B, 2009, 97(3): 639 - 643.
- 28 L J Li, B Q Yao, Z G Wang, *et al.*. Double diode-pumped continuous wave operation of a *c*-cut 2044-nm Tm, Ho:YAlO₃ laser[J]. Laser Phys Lett, 2009, 6(5): 359-362.
- 29 L J Li, B Q Yao, Z G Wang, *et al.*. Continuous wave and AO Q-switch operation of a *b*-cut Tm, Ho:YAP laser with dual wavelengths pumped by a laser diode of 792 nm[J]. Laser Phys, 2010, 20(1): 205-208.
- 30 Baoquan Yao, Xiaoming Duan, Liangliang Zheng, *et al.*. Continuous-wave and Q-switched operation of a resonantly pumped Ho:YAlO₃ laser[J]. Opt Express, 2008, 16(19): 14668 -14674.
- 31 B Q Yao, X T Yang, X M Duan, *et al.*. Continuous-wave operation of a Ho:YAlO₃ laser pumped by a Tm-doped silicon fiber laser[J]. Laser Phys Lett, 2009, 6(7): 509-512.
- 32 X M Duan, B Q Yao, G Li, *et al.*. High efficient continuous wave operation of a Ho:YAP laser at room temperature[J]. Laser Phys Lett, 2009, 6(4): 279-281.
- 33 X M Duan, B Q Yao, X T Yang, *et al.*. Room temperature efficient continuous wave and Q-switched operation of a Ho:YAP laser[J]. Appl Phys B, 2009, 96(2-3): 379-383.
- 34 I F Elder, M J P Payne. Lasing in diode-pumped Tm:YAP, Tm, Ho:YAP and Tm, Ho:YLF[J]. Opt Commun, 1998, 145(1): 329-339.
- 35 L J Li, B Q Yao, C W Song, *et al.*. Continuous wave and AO Q-switch operation Tm, Ho:YAP laser pumped by a laser diode of 798 nm[J]. Laser Phys Lett, 2009, 6(2): 102-104.
- 36 L J Li, B Q Yao, Y L Ju, *et al.*. Dual diodes end-pumped Q-switch operation of a *c*-cut 2044-nm Tm, Ho:YAlO₃ laser[J]. Laser Phys Lett, 2009, 6(5): 367-369.
- 37 Baoquan Yao, Linjun Li, Liangliang Zheng, *et al.*. Diode-pumped continuous wave and Q-switched operation of a *c*-cut Tm, Ho:YAlO₃ laser[J]. Opt Express, 2008, 16(7): 5075-5081.
- 38 L J Li, B Q Yao, J P Qin, *et al.*. High power and efficiency of a 2044-nm *c*-cut Tm, Ho:YAlO₃ laser[J]. Laser Phys, 2011, 21(3): 489-492.
- 39 L J Li, B Q Yao, D Y Wu, *et al.*. High efficient double end-pumped *b*-cut Tm, Ho:YAlO₃ laser[J]. Laser Phys, 2011, 21(3): 446-449.
- 40 L J Li, Y F Bai, X M Duan, *et al.*. A continuous-wave *b*-cut Tm, Ho:YAlO₃ laser with output 15 W pumped by two laser

- diodes[J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10(3): 035802.
- 41 T L Feng, S Z Zhao, K J Yang, *et al.*. A diode-pumped passively Q -switched Tm, Ho:YAP laser with a single-walled carbon nanotube[J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10(9): 095001.
- 42 Y L Ju, C H Zhang, F Chen, *et al.*. Room temperature single longitudinal mode Tm, Ho:YAP microchip laser at 2102.6 nm [J]. *Laser Phys*, 2011, 21(1): 97–100.
- 43 H Bromberger, K J Yang, D Heinecke, *et al.*. Comparative investigations on continuous wave operation of a -cut and b -cut Tm, Ho:YAlO₃ lasers at room temperature[J]. *Opt Express*, 2011, 19(7): 6505–6513.
- 44 B Q Yao, F Chen, C H Zhang, *et al.*. Room temperature single-frequency output from a diode-pumped Tm, Ho:YAP laser[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(9): 1554–1556.
- 45 B Q Yao, F Chen, G Li, *et al.*. Diode pumped operation of 1 mm Tm, Ho:YAP microchip laser[J]. *Laser Phys*, 2011, 21(12): 2011–2014.
- 46 K J Yang, D C Heinecke, C Kölbl, *et al.*. Mode-locked Tm, Ho:YAP laser around 2.1 μm [J]. *Opt Express*, 2013, 21(2): 1574–1580.
- 47 Baoquan Yao, Xiaoming Duan, Liangliang Zheng, *et al.*. Continuous-wave and Q -switched operation of a resonantly pumped Ho:YAlO₃ laser[J]. *Opt Express*, 2008, 16(19): 14668–14674.
- 48 G L Zhu, X D He, B Q Yao, *et al.*. Ho:YAP laser intra-cavity pumped by a diode-pumped Tm:YLF laser[J]. *Laser Phys*, 2013, 23(1): 015002.
- 49 S S Cai, J Kong, B Wu, *et al.*. Room-temperature cw and pulsed operation of a diode-end-pumped Tm:YAP laser[J]. *Appl Phys B*, 2008, 90(1): 133–136.
- 50 Igor Razdobreev, Alexander Shestakov. Self-pulsing of a monolithic Tm-doped YAlO₃ microlaser[J]. *Phys Rev A*, 2006, 73(5): 053815.
- 51 Amy C Sullivan, Gregory J Wagner, Douglas Gwin, *et al.*. High power Q -switched Tm:YAlO₃ lasers[C]. *Advance state-solid Photonics*, 2004, 94(1): 329–331.
- 52 I F Elder, M J P Payne. Comparison of diode-pumped Tm:YAP with Tm:YAG[C]. *Advanced Solid State Lasers*, 1998, 19(2): 212–217.
- 53 Pavel Černý, Jan Šulc, Helena Jelínková. Continuously tunable diode pumped Tm:YAP laser[C]. *SPIE*, 2006, 6190: 619008.