·固体激光器·



# 高效紧凑室温 Yb:YAG 板条全固态激光技术研究

高清松<sup>1,2</sup>, 周唐建<sup>1,2</sup>, 尚建力<sup>1,2</sup>, 汪 丹<sup>1,2</sup>, 李 密<sup>1,2</sup>, 邬映臣<sup>1,2</sup>, 王君涛<sup>1,2</sup>, 王亚楠<sup>1,2</sup>, 徐 浏<sup>1,2</sup>, 杜应磊<sup>1,2</sup>, 陈小明<sup>1,2</sup>, 张 凯<sup>1,2</sup>, 唐 淳<sup>1,2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所,四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 高能激光科学与技术重点实验室,四川 绵阳 621900)

摘 要: 报道了高效紧凑室温 Yb:YAG 板条全固态激光研究进展。建立了室温 Yb 板条激光动力学模型, 分析了泵浦激光通量和注入激光亮度与光光效率的关系,以及板条边缘效应抑制方法。实验获得了输出功率 22.3 kW、光光效率 36% 和光束质量优于 2.4 倍衍射极限的激光输出,为更高功率的 Yb 板条激光关键技术研究及 开发小型化、轻量化、实用化的高功率激光器奠定了基础。

关键词: 激光技术; 固体激光; 板条激光; 光束质量 中图分类号: TN248.1 文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.200185

## High efficiency and compact Yb:YAG slab all-solid-state laser at room temperature

Gao Qingsong<sup>1,2</sup>, Zhou Tangjian<sup>1,2</sup>, Shang Jianli<sup>1,2</sup>, Wang Dan<sup>1,2</sup>, Li mi<sup>1,2</sup>, Wu Yingchen<sup>1,2</sup>, Wang Juntao<sup>1,2</sup>, Wang Ya'nan<sup>1,2</sup>, Xu Liu<sup>1,2</sup>, Du Yinglei<sup>1,2</sup>, Chen Xiaoming<sup>1,2</sup>, Zhang Kai<sup>1,2</sup>, Tang Chun<sup>1,2</sup> (1. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Key Laboratory of High-energy Laser Science and Technology, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** This paper presents the research progress of high efficiency and compact all-solid-state lasers based on Yb:YAG slab at room temperature. The laser dynamics model of Yb slab at room temperature is established. It is quantitatively analysed that the pumped laser intensity and the injected laser brightness influence the optical conversion efficiency. The method to suppress the slab-edge-effect is founded. The output power of 22.3 kW, the optical conversion efficiency of 36%, and the beam quality of 2.4 times diffraction limit, were achieved in experiment. These results lay a foundation for the key technology research of higher power laser and development of the miniaturized, lightweight and practical high power Yb slab laser.

Key words: laser technology; solid state laser; slab laser; beam quality

二极管泵浦的全固态激光器具有效率高、光束质量好、工作稳定、体积小、成本低和维护简单等优点,已广 泛应用于激光加工、科学研究及国防防御等领域。但随着二极管泵浦功率的增加,棒状介质的全固态激光功率 和光束质量严重受限于增益介质的温度梯度、热应力及热致双折射等,难以向更高平均功率激光发展。为了克 服热效应的影响,科研人员提出了多种激光介质构型的固体激光器,如板条、薄片和光纤等方案。板条激光器中 光束沿"之"字型光路传输,理论上可以完全补偿一阶热聚焦和热致双折射效应,输出光束质量好。自1972年 Martin 提出板条构型以来,研究人员采用二极管激光器侧泵浦<sup>[1]</sup>、端泵浦<sup>[2]</sup>和角泵浦<sup>[3]</sup>等多种方式,取得了令人瞩 目的成绩,Nd:YAG板条激光的平均输出功率已达到100 kW,成为当前公开报道的全固态激光最高输出功率<sup>[4]</sup>。 但从实际应用来看,Nd:YAG板条激光的电光效率低和单孔径输出功率受限等原因制约了其在系统上的应用,如 Northrop Grumman 公司的7路合成固体激光器和 Textron 公司的谐振腔固体激光器,均难以走出实验室,进行系统应用。

在高功率板条激光器中,激光介质吸收泵浦光产生激光的同时,激光介质也产生了热效应和边缘效应,这些效

<sup>\*</sup> 收稿日期:2020-07-02; 修订日期:2020-09-22

基金项目:国家自然科学基金项目(61705209)

作者简介:高清松(1972—),男,硕士生导师,研究员,从事高功率全固态激光技术研究;15883798199@163.com。

应会导致光束质量下降和输出功率受限,甚至造成激光介质损坏。为了提高输出功率,降低激光介质的产热率是一个很有效的技术途径。随着二极管泵浦亮度的提升,相较于 Nd:YAG 激光晶体,Yb:YAG 在高功率激光系统中显示出更大的优势。Yb:YAG 在室温条件下能级结构为准三能级结构(无上能级转换),具有量子亏损低(仅为9%)、吸收光谱和发射光谱宽等特点。2001年,Goodno 首次报道了室温 Yb:YAG 的传导冷却端面泵浦板条激光器,实现 415 W 近衍射极限激光输出<sup>[2]</sup>。

近期,中国工程物理研究院应用电子学研究所高能固体激光团队采用复合掺杂的 Yb:YAG 增益介质,大幅提升传导冷却端面泵浦板条激光输出功率及性能。复合掺杂的 Yb:YAG 板条能有效分散增益介质内部热产生,同时避免泵浦激光长程吸收导致的泵浦强度剧烈下降的缺陷。2016年,陈小明等首次报道了复合掺杂 Yb:YAG 板条模块构成的激光器,实现 3.6 kW 激光输出<sup>[5]</sup>。2017年,李密等在优化板条增益模块和放大链路的基础上实现 7 kW 连续激光输出<sup>[6]</sup>。2018年,徐浏等采用两个 Yb 板条增益模块串接放大并利用主动光学校正系统,实现连续激光功率11.9 kW、光束质量 β 优于 2.8 的激光输出<sup>[7]</sup>。

本文报道了室温下高效高功率 Yb:YAG 板条激光技术研究。结合高功率激光器的应用环境和发展趋势,围绕高效率高功率板条激光中的关键技术问题,获得了输出功率 22.3 kW、光光效率 36% 和光束质量 β 优于 2.4 倍衍射极限的激光输出,为更高功率的 Yb 板条激光关键技术研究及开发小型化、轻量化、实用化的高功率激光器奠定了基础。

#### 1 室温 Yb:YAG 板条激光动力学分析

Yb:YAG的能级结构<sup>18</sup> 如图 1 所示, Yb:YAG 仅有 2F<sub>7/2</sub> 基态和 2F<sub>5/2</sub> 激发态两个能级,没有浓度猝灭和上转换 等效应<sup>19</sup>, Yb:YAG 的量子亏损很小。Yb:YAG 的激光动力学过程较复杂,主要特征为:吸收截面和受激发射截面 依赖于 Yb:YAG 的温度;室温条件下, Yb:YAG 对 1030 nm 激光存在自吸收,实验测得的荧光谱与实际激光过程的 增益谱有一定差异;上下能级的各 Stark 子能级分别构成两个热平衡态。为了实现高效的激光作用,泵浦亮度需要 达到阈值的数倍。

图 2 为 300 K 时 Yb:YAG 的吸收光谱和受激发射光谱<sup>[10]</sup>,由图 2 可以知道, Yb:YAG 最强的吸收峰在 941 nm,其 吸收带宽达到 18 nm,激光跃迁的中心波长为 1030 nm。



Yb:YAG激光器的输出性能受介质工作温度影响较大,温度升高将会导致Yb:YAG下能级的热粒子数增加、 受激发射截面减小,进而使得激光器效率下降。低温冷却Yb:YAG可以减少热粒子数和增大受激发射截面,从而 提高了Yb:YAG激光器的光光效率<sup>[11-4]</sup>。但还需解决低温冷却Yb:YAG激光器的激光系统体积庞大、低温与室温 交变时激光器稳定性差等问题,才能得到实际应用。Yb激光体制在室温下为准三能级系统,需要高亮度泵浦和高 通量激光注入才能获得高效率激光输出。且Yb板条在提取过程中,存在材料自吸收和自发辐射放大(ASE)相互 耦合。在已有高能固体激光理论模型的基础上,完善Yb:YAG高功率激光动力学放大理论模型,直观显示了各种 因素对光光转换效率的影响,并分析增益介质中自发辐射对激光提取的影响和泵浦提取过程产热特性及板条边缘 发热特性。

#### 板条边缘效应抑制技术 2

非圆对称结构的板条激光具有很大的边缘温度梯度和边缘应力,其主要原因在于高泵浦通量导致入射到侧面 的泵浦功率密度高以及大尺寸 Yb 板条中 ASE 荧光部分被侧面吸收。为了减小板条边缘的透射波前畸变, 对板条 构型进行特殊设计来抑制板条边缘效应。分析板条宽度方向上温度梯度分布和激光波前的边缘效应,建立了合理 的边缘效应分析的数理模型。基于泵浦提取产热特性和边缘发热特性,利用热传导方程,通过数值迭代算法,对板 条宽度方向上的波前边缘效应进行分析。

40

35

0

0 2 4

优化板条构型,利用外侧面来减小掺杂区边缘的温度梯 度,进而提高输出激光的光束质量,增大激光板条的可用口 径,提高光光转换效率。图3是特殊构型板条增益模块输出 波前数值模拟结果。通过板条边缘的特殊设计,板条掺杂区 90% 口径的温差不大于 2 ℃, 波前起伏小于 2 µm, 中间区域 平坦无高阶量。理论计算和实验验证表明,对板条边缘特殊 设计能有效地降低板条边缘区域大温度梯度和波前畸变,进 而有效抑制板条边缘效应,为获得优质光束质量打下基础。

#### 3 低像差高负载放大链路设计技术

在板条激光放大链路中(平均光通量大于10kW/cm<sup>2</sup>), 透射式元件因材料的吸收散射带来主激光功率损失,元件表

面的剩余反射光逆向传输放大导致系统的稳定性下降。另外,高储能增益模块的波前畸变会导致激光经自由空间 传输后在板条出入口处衍射损耗增加,加大系统安全风险。为降低透射元件使用率,增强激光系统的稳定性,激光 链路采用反射式 4f 像传递设计。

相对透射式链路设计,反射式链路的静态像差明显减 小。在板条宽度方向,光线正入射到球面反射镜表面,主要 产生球差;在厚度方向,镜面略微倾斜,主要产生像散。因反 射式 4f像传递光路采用旁轴对称像差补偿设计。厚度方向 上的像散可以相互补偿,如图4。但宽度方向上的球差无法 以相同的方式被消除,且会在沿着链路传输的过程中不断累 积扩大。但对于同样焦距的透射元件与反射元件,反射元件



effective aperture of slab

length in Yb slab's width direction/mm

Fig. 3 Wavefront distortion of slab gain module

图 3 板条增益模块波前畸变

12 16 20

24

28 30 32

Fig. 4 Optical path of reflective 4f image system 图 4 反射式 4f 像传递光路

曲率是透射元件的4倍,其球差值大幅降低。实验测得,弱光下反射式放大4/系统全链路的球差 PV 值仅为透射 式的1/4,如图5所示。



(a) transmission laser amplification chain



(b) reflection laser amplification chain



室温 Yb 板条激光要实现高效率激光输出,泵浦激光亮度和注入激光通量均要提升,对光学元件的负载能力提 出了较高要求。采用板条表面微处理技术,降低板条表面 10 µm 缺陷的数量,提高板条基底表面光学质量。板条 的棱边和端面进行精细处理,板条崩边得到有效控制。对镀膜过程中产生的边缘绕射、薄膜材料吸收及清洗溅射 表面缺陷进行处理,以遏制泵浦光和注入激光对端面共同加热导致的端面温度异常升高,降低端面温度和应力。 利用等效折射率和匹配层的方法设计全新的激光晶体的增透膜,提高了制备的重复性和激光损伤阈值。实现板条 大面与端面锐角边缘满镀,边缘缺陷控制在15 μm以下。通过降低膜层边缘缺陷率,板条端面温升降低约40%。 图 6 为板条表面精细处理前后微观形貌对比图,通过对板条表面加工及镀膜工艺的优化,板条端面及棱边的表面 质量得到明显提升。



 Fig. 6
 Contrast diagram of slab surface quality

 图 6
 板条端面及棱边表面质量对比图

### 4 多增益模块 MOPA 放大技术

为验证高储能 Yb 增益模块输出功率及多模块 MOPA 放大的可行性,在实验室搭建了一台由 3 个 Yb:YAG 板条增益模块组成的高功率连续激光放大链路。该链路主要包含光纤激光种子源、预放大器、主放大器及主动光学校正系统,如图 7 所示。图中, A1, A2, A3 为孔径光阑, BS1, BS2, BS3 为整形透镜组,实现放大链路中各级功放元件及主动光学矫正系统的口径匹配; GM1, GM2 为板条增益模块,通过采用大口径多浓度掺杂的 Yb:YAG 板条设计及微通道高效冷却等技术,实现 Yb 板条高亮度泵浦及激光功率高效放大; AO 为主动光学校正系统,用于提升输出激光光束质量,主要包括哈特曼波前测量系统(SH)和变形镜(DM)等, DM 为 67 单元变形镜,有效校正口径大于 70 mm。

测试高储能增益模块的光光效率,注入激光功率为11 kW,激光通量为16.3 kW/cm<sup>2</sup>。在主放增益模块的泵浦 功率为31 kW时,从模块中提取功率为11.3 kW,光光效率36.5%,如图8所示。激光放大链路总输出功率22.3 kW, 输出光束波前畸变经主动光学系统校正,获得光束质量优于2.4 倍衍射极限的激光输出,这是目前国际上基于室 温 Yb:YAG 板条的最高输出功率和最优的光束质量。光光效率不高的主要原因在于目前的激光泵浦亮度较低 (~20 kW/cm<sup>2</sup>)和激光通量低(16.3 kW/cm<sup>2</sup>)。理论计算表明,减小传输损耗、提升激光泵浦亮度(~30 kW/cm<sup>2</sup>)和 激光通量(25 kW/cm<sup>2</sup>),光光效率可大幅提升至46%。



放大链路输出激光波前畸变由哈特曼波前传感器测得。当输出功率 22.3 kW 时,波前畸变的 PV 与 RMS 值分 别为 3.3 μm 和 0.5 μm。主动光学系统闭环后,输出光束波前畸变的 PV 与 RMS 值被变形镜校正到 0.7 μm 与 0.1 μm。 校正效果由光束质量测试仪(β仪)测试获得。放大链路输出激光光束质量 β 由 9.2 提升至 2.4, 如图 9 所示。实验 结果进一步说明 Yb:YAG 板条增益模块能够有效放大激光功率同时保持良好的光束质量。

#### 5 室温 Yb 板条激光的应用

团队研制了 20 kW 的高功率 Yb 板条激光样机并得 到实际应用,通过样机的应用进一步验证室温 Yb 板条 激光技术可行性。板条增益模块采用三级模块化设计 和热管理一体化设计,模块体积小于 0.05 m<sup>3</sup>,可提取激 光功率大于 20 kW,单次工作时间大于 150 s。由板条增 益模块组成的激光链路输出功率 20 kW 时,测得激光启 动时间优于 0.4 s,而其他类型激光器的启动时间一般约 2 s,在实际应用中具有优势。采用紧凑型设计,激光链



 Fig. 9 Far-field intensity distribution of Yb slab laser at the room temperature
 图 9 Yb 板条激光远场强度分布

路的体积功率比为 35 kW/m<sup>3</sup>,该技术路线的紧凑性得到初步验证。激光链路累计稳定出光时间 4000 s,考核了长时间稳定工作能力。

#### 6 结 论

针对高功率激光光源需求,采用二极管激光泵浦 Yb:YAG 板条激光放大技术路线,验证了室温 Yb 板条实现高 功率激光输出的可行性,增强了对室温下大口径 Yb 增益介质强高亮度泵浦、高通量注入下激光放大过程的物理 认识和理解,并实现单链路 22.3 kW,光束质量优于 2.4 倍衍射极限激光输出。该项研究结果为高功率激光技术进 一步发展提供了重要参考价值,为实现高功率高效率紧凑型激光器奠定重要的技术基础。

#### 参考文献:

- [1] 高清松, 童立新, 李德明, 等. 二极管泵浦Nd:YAG棒双通放大器技术[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4): 26-28. (Gao Qingsong, Tong Lixin, Li Deming, et al. Diode pumped Nd:YAG rod dual-pass amplifier technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(4): 26-28.)
- [2] Goodno G D, Palese S, Harkenrider J, et al. Yb:YAG power oscillator with high brightness and linear polarization [J]. Optics Letters, 2001, 26(21): 1672-1674.
- [3] 柳强, 巩马理, 陆富源, 等. 高功率二极管角抽运Yb:YAG板条激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(12): 13. (Liu Qiang, Gong Mali, Lu Fuyuan, et al. High power diode corner pumped Yb:YAG slab lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(12): 13)
- [4] Marmo J, Injeyan H, Komine H, et al. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman [C]//Proc of SPIE. 2009: 7195071.
- [5] Chen Xiaoming, Xu Liu, Hu Hao, et al. High efficiency, high-average-power, CW Yb:YAG zigzag slab MOPA at room temperature [J]. Optics Express, 2016, 24(21): 24517-24523.
- [6] Li Mi, Hu Hao, Wang Juntao, et al. A 7.08-kW YAG/Nd:YAG/YAG composite ceramic slab laser with dual concentration doping[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 1503010.
- [7] Xu Liu, Wu Yingchen, Du Yinglei, et al. High brightness laser based on Yb:YAG MOPA chain and adaptive optics system at room temperature[J]. Optics Express, 2018, 26(11): 14592-14600.
- [8] Bruesselbach H W, Sumida D S, Reeder R A, et al. Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb:YAG lasers[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 1997, 3(1): 105-115.
- [9] 於海武, 段文涛, 徐美健, 等. Yb激光材料综述[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(5): 30-41. (Yu Haiwu, Duan Wentao, Xu Meijian, et al. Overview of Yb Laser materials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(5): 30-41)
- [10] Casagrande O, Robin N D, Garrec B L, et al. Time and spectrum resolved model for quasi-three-level gain-switched lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007, 43(2): 206-212.
- [11] Fan T Y, Ripin D J, Roshan L, et al. Cryogenic Yb<sup>3+</sup> doped solid state lasers [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2007, 13(3): 448-459.
- [12] Ganija M, Ottaway D J, Veitch P J, et al. Cryogenic, conduction cooled, end pumped, zigzag slab laser, suitable for power scaling[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). 2012.
- [13] 吴明武, 吴慧云, 许晓军, 等. 低温冷却高平均功率Yb:YAG激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47: 071403. (Wu Mingwu, Wu Huiyun, Xu Xiaojun, et al. Low temperature cooling high average power Yb:YAG laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47: 071403)
- [14] 张振华,陈小劲,王建磊,等. 基于无水乙醇冷却的Yb:YAG片状晶体激光放大特性研究[J]. 中国激光, 2011, 38: 0702013. (Zhang Zhenhua, Chen Xiaojin, Wang Jianlei, et al. Laser amplification characteristics of Yb:YAG flake crystals based on anhydrous ethanol cooling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38: 0702013)