

高功率陶瓷板条激光器

宋艳洁 朱铎 薄勇 彭钦军 李江

High power ceramic slab laser

SONG Yanjie, ZHU Duo, BO Yong, PENG Qinjun, LI Jiang

引用本文:

宋艳洁, 朱铎, 薄勇, 等. 高功率陶瓷板条激光器[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1195–1200. DOI: 10.5768/JAO202344.0610005

SONG Yanjie, ZHU Duo, BO Yong, et al. High power ceramic slab laser[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1195–1200. DOI: 10.5768/JAO202344.0610005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高能高功率激光参数测量技术研究

Study on parameters measurement technology of high energy and high power laser

应用光学. 2020, 41(4): 645–650 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409001>

高功率固体激光器增益非均匀分布引起的效能亏损效应研究

Efficiency loss induced by non-uniform gain distribution in high power solid state lasers

应用光学. 2019, 40(4): 542–550 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0401003>

激光超声检测带过渡圆角平板表面缺陷的数值研究

Numerical study on surface defects detection of plate with transition fillet by laser ultrasound

应用光学. 2020, 41(1): 214–219 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0107005>

高稳定性低噪声的561 nm黄光激光器

561 nm yellow laser with high stability and low noise

应用光学. 2017, 38(3): 499–505 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0307002>

外腔半导体激光器在高低温下的机械形变与功率变化

Mechanical deformation and power change of external cavity semiconductor laser under temperature change

应用光学. 2021, 42(4): 586–591 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401003>

高重复频率锁模光纤激光器及其超连续谱产生

High repetition-rate mode-locked fiber laser and generation of supercontinuum

应用光学. 2018, 39(6): 916–920 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0607001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 06-1195-06

高功率陶瓷板条激光器

宋艳洁^{1,2}, 朱 铎^{1,2}, 薄 勇^{1,2}, 彭钦军^{1,2}, 李 江³

(1. 中国科学院理化技术研究所 固体激光重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院理化技术研究所 功能晶体与激光技术重点实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 201899)

摘 要: 高功率固体激光在先进制造、能源、信息、医疗及国防等领域有广泛应用。激光陶瓷材料具有掺杂浓度均匀可控、抗激光热损伤能力强、易于制备大尺寸和复合结构等优点, 被认为是高功率固体激光的重要增益材料。报道了本课题组近年来在高功率陶瓷板条激光方面的主要研究进展。采用中国科学院上海硅酸盐所制备的大尺寸Nd:YAG陶瓷板条, 实现了平均功率4.35 kW的1064 nm脉冲激光输出, 脉冲宽度为160 μ s, 重复频率为400 Hz。此外, 采用中科院上海硅酸盐所制备的大尺寸Yb:YAG陶瓷板条, 实现了平均功率9.8 kW的1030 nm脉冲激光输出, 脉冲宽度为560 μ s, 重复频率为160 Hz, 光光转换效率为60%。这些研究表明, 激光陶瓷材料具备实现高功率、高光束质量与高效率激光的潜力。

关键词: 激光; 高功率; 陶瓷; 板条; YAG

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0610005

High power ceramic slab laser

SONG Yanjie^{1,2}, ZHU Duo^{1,2}, BO Yong^{1,2}, PENG Qinjun^{1,2}, LI Jiang³

(1. Key laboratory of Solid-state Laser, Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing 100090, China;
2. Key Laboratory of Functional Crystals and Laser Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing 100090, China; 3. Shanghai Institute of Ceramics, CAS, Shanghai 201899, China)

Abstract: High power solid-state laser has been widely used in energy, advanced manufacturing, information, medical and military defense fields. As a new generation of solid laser materials, the laser ceramic materials are characterized by uniform and controllable doping concentration, good optical uniformity, strong resistance to laser thermal damage, easy to prepare large size and composite structure, which have great potential in high power laser generation. In this paper, the research progress of high power ceramic slab laser in recent years was reported. The Nd:YAG ceramic slab laser was developed. It could be realized that the maximum output power was 4.35 kW and the laser pulse width was 160 μ s at a repetition rate of 400 Hz. Moreover, the Yb:YAG ceramic slab laser was developed with the maximum output power of 9.8 kW under the pulse width of 560 μ s and repetition frequency of 160 Hz. The optical conversion efficiency was 60% relative to the absorbed pumped power. These studies have explored new technical ways for the further development of high beam quality and high efficiency solid-state laser with higher output power.

Key words: lasers; high power; ceramics; slab; YAG

收稿日期: 2023-09-22; 修回日期: 2023-10-11

基金项目: 国家自然科学基金 (62205349)

作者简介: 宋艳洁 (1992—), 女, 博士, 特别研究助理, 主要从事全固态激光器及变频技术研究。

E-mail: songyanjie@mail.ipc.ac.cn

通信作者: 薄勇 (1972—), 男, 博士, 研究员, 主要从事全固态高功率激光技术研究。E-mail: boyong@mail.ipc.ac.cn

引言

高功率固体激光在航空航天、轨道交通、海洋及卫星产业等高端装备制造领域以及高能量密度科学和聚变能源等国际前沿研究领域均有广泛的应用前景,对于国家经济发展和国防安全均有重大战略意义^[1-5]。然而,在高功率激光器中,传统棒状激光器的热效应会随着输出功率的增加而加剧,不仅制约着激光输出功率的提高,显著降低光束质量,严重时还会导致增益介质的碎裂。为解决这一问题,美国通用公司于 20 世纪 70 年代提出了 Zigzag 板条激光器的概念^[6],即激光在增益介质内“之”字形传输,以均匀一个方向上的温度梯度,它与棒状激光器和直通型板条激光器不同,激光在穿过板条时经历相同的温度梯度,从而补偿了厚度方向上的部分热畸变,大大降低了热效应对光束质量的影响^[7]。此外,薄板条的结构外表面积较大,可用作高效散热的冷却面,使增益介质内的温度梯度降低;较大的表面积同时可提供较大的泵浦面积,有利于提高泵浦功率,实现高功率输出。2002 年,美国 TRW 公司利用半导体激光器(简称 LD)泵浦的 Nd:YAG 晶体板条实现了 5.4 kW 的输出功率^[8]。2009 年,美国 Northrop Grumman 公司利用基于 Nd:YAG 晶体板条的 7 路主振荡功率放大器(MOPA)链条实现了 105 kW 的输出功率^[9]。虽然目前基于 Nd:YAG 的板条激光器已经实现了极高的输出功率,但进一步提高输出功率变得越来越困难。这是因为传统的 Nd:YAG 晶体板条生长受限于工艺,很难生产出大尺寸、高质量的 Nd:YAG 晶体坯料。

作为新一代激光增益材料,激光陶瓷与激光晶体相比优势颇多^[10-12]。陶瓷材料通常由高纯度晶体纳米粉末通过高温烧结压制而成,这一过程消除了晶体的生长限制,从而可以获得晶体无法达到的尺寸,还可以实现不同掺杂和不同材料共同烧结。因此,激光陶瓷具有成本低、制备周期短、加工简单、烧结温度低、尺寸大、体积构型灵活等优点。此外,高掺杂浓度激活离子的激光陶瓷仍能表现出良好的光学和激光性能,这是晶体不具备的特性。与同类型的激光晶体相比,陶瓷具有更好的机械性能^[13-14],抗激光热损伤能力更强。激光陶瓷这些优异的特性为发展大能量、高功率激光技术开辟了机会。

1995 年,日本科研工作者利用氧化物固相反应法制备出了散射损耗低至 0.009 cm^{-1} 的 Nd:YAG 高透明陶瓷,并实现了常温下首次采用透明陶瓷实现激光输出^[15]。自此以后,使用透明激光陶瓷作为增益材料的激光技术迅速发展起来。2002 年 LUJ 等人使用掺杂浓度为 0.6%、尺寸为 $\Phi 4\text{ mm}\times 105\text{ mm}$ 的单根 Nd:YAG 陶瓷棒实现了 1.46 kW 的连续激光输出^[16]。2006 年, Livermore 实验室使用 Nd:YAG 陶瓷获得 67 kW 的高功率 Nd:YAG 陶瓷板条激光输出^[17]。2010 年,美国达信公司使用 Nd:YAG 激光陶瓷获得了 100 kW 量级的激光输出^[18]。

我国关于透明陶瓷激光技术的研究起步相对较晚。目前国内从事透明陶瓷激光技术研究的单位有中国科学院理化技术研究所、中国工程物理研究院、中电 11 所等。其中中国科学院理化技术研究所从 2005 年开始陶瓷激光技术研究,2007 年本课题组利用上海硅酸盐研究所研制的 Nd:YAG 激光陶瓷材料,在国内率先研制出功率达 10 W 的陶瓷激光器^[19];2010 年本课题组利用上海硅酸盐研究所研制的 $\Phi 6\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的 Nd:YAG 陶瓷棒在国内率先实现了千瓦级激光输出^[20],当泵浦功率为 2511 W 时,准连续 1064 nm 激光输出功率达 961 W,光光转换效率为 38.3%。同时,本课题组对比研究了陶瓷材料与晶体材料的激光热损伤特性。经实验和理论仿真发现,在相同条件下,陶瓷材料的激光热损伤阈值较晶体材料高 60% 以上,这意味着陶瓷材料比晶体材料在激光损伤性能方面更有利于输出高功率激光^[21]。与棒状增益介质相比,板条状的增益材料在热管理性能方面有着更好的优势,更适合用于高功率的激光定标放大。本课题组近年来对激光陶瓷板条开展了系列研究,本文总结了课题组在高功率陶瓷板条激光技术方面的主要研究进展。

1 Nd:YAG 陶瓷板条激光器

近年来, Nd:YAG 透明陶瓷发展迅速,其几乎具有 Nd:YAG 单晶的全部优点:良好的光学、物理、化学及机械性能等。早期 Nd:YAG 透明陶瓷比 Nd:YAG 单晶具有更大的散射损耗;但现今 Nd:YAG 透明陶瓷的散射损耗已接近于 Nd:YAG 单晶。课题组采用上海硅酸盐研究所研制的 Nd:YAG 透明陶瓷进行了陶瓷激光的实验研究,实验装置如图 1 所示。

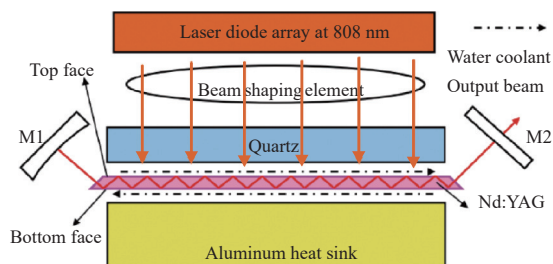


图1 Nd:YAG陶瓷板条激光实验装置

Fig. 1 Structure diagram of Nd:YAG ceramic slab laser experimental setup

Nd:YAG陶瓷板条采用等腰梯形结构,其尺寸为 $120\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 3\text{ mm}$,掺杂浓度为 $1\text{ at.}\%$,尺寸端面切角约为 55° 。板条的大面和端面均经过严格的光学级抛光,在板条的上大面镀 808 nm 泵浦光增透膜,板条的下大面镀 808 nm 泵浦光高反膜;在板条的上、下大面镀一层倏逝波保护膜,使振荡激光在这两面之间的全内反射不受机械安装和密封零件破坏。Nd:YAG陶瓷板条激光实验采用波长为 808 nm 的半导体激光器阵列(LDA)进行泵浦,并调节其温度,从而使泵浦波长对准Nd:YAG陶瓷的吸收峰。泵浦光由LDA出射后,经过泵浦光整形系统,对泵浦光进行匀化,并耦合进板条上大面中。

激光器采用平凹腔结构设计,M1为凹面镜,曲率半径为 750 mm ,表面镀有 1064 nm 高反膜(反射率 $\geq 99.8\%$);M2为平面镜,对 1064 nm 激光的透过率为 60% 。当LD泵浦功率为 9984 W 时,Nd:YAG陶瓷板条实现了平均功率 4350 W 的 1064 nm 激光输出,光光效率达到了 43.6% 。同时,在实验中对陶瓷板条和晶体板条的激光输出特性进行了对比,如图2所示。

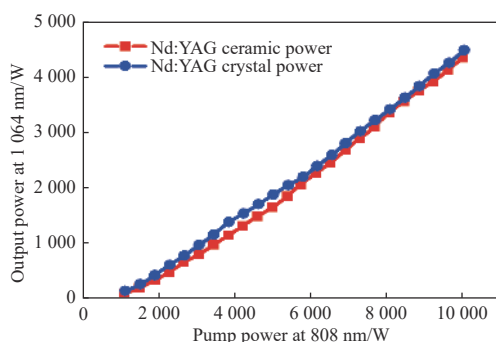


图2 Nd:YAG陶瓷板条激光和晶体板条激光输出功率曲线

Fig. 2 Output power of Nd:YAG ceramic slab laser setup versus pump power

在相同的泵浦功率下,晶体板条的输出功率为

4500 W ,光光效率为 45% 。两者相比,陶瓷板条的输出功率略低于晶体板条 3% ,可以说基本相当。

2 高功率 Yb:YAG 陶瓷板条激光器

相比于Nd:YAG晶体材料,Yb:YAG陶瓷材料表现出更好的特性:首先, Yb^{3+} 的主要吸收峰和发射峰的波长距离更近,量子亏损更小,有助于降低热累积;其次, Yb^{3+} 的荧光寿命较长,在储能方面具有优势;此外, Yb^{3+} 的能级结构比较简单,所以在高浓度掺杂下的Yb:YAG陶瓷也不存在浓度猝灭;而且,由于Yb:YAG陶瓷在 940 nm 附近有较宽的吸收带宽,Yb:YAG激光器可以在很宽的温度范围内工作,极大降低了二极管泵浦源的温度控制难度。基于上述优点,我们采用上海硅酸盐研究所研制的Yb:YAG陶瓷材料作为激光增益介质,设计了Yb:YAG陶瓷板条激光装置,其结构如图3所示。

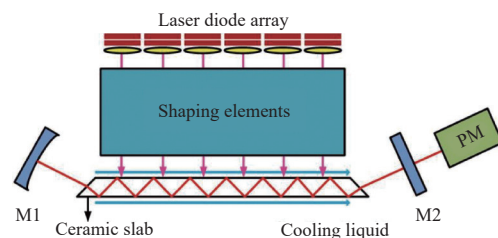


图3 Yb:YAG陶瓷板条激光装置结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of Yb:YAG ceramic slab laser setup

陶瓷板条激光模块仍然采用梯形结构,板条尺寸为 $173.6\text{ mm}\times 66\text{ mm}\times 6\text{ mm}$,掺杂浓度为 $0.6\text{ at.}\%$,其上大面尺寸为 $159.3\text{ mm}\times 66\text{ mm}$,下大面尺寸为 $173.6\text{ mm}\times 66\text{ mm}$,两端切角均为 40° 。板条的两端面镀有 1030 nm 光的增透膜,以减少激光在端面反射的损耗。板条上下大面镀有泵浦光 940 nm 的增透膜,透过率达到 99.8% ,以确保泵浦光几乎完全通过上大面进入板条并被吸收。板条的2个侧面做打毛处理,从而抑制放大的自发辐射(ASE)并避免自激振荡在两侧面间产生。冷却液从上下大面经过,采用直接液冷的方式来进行散热。

Yb:YAG板条激光装置采用波长为 940 nm 的LDA进行泵浦,并调节其温度从而使泵浦波长对准Yb:YAG的吸收峰。泵浦光由LDA出射后,同样经过泵浦光整形系统进行匀化,并耦合进板条上大面中。为了在获得较高的反转粒子数的同时减少热量的产生,泵浦源采用准连续波(QCW)泵浦,重复频率为 160 Hz ,脉冲宽度为 $600\text{ }\mu\text{s}$ 。

为了产生激光输出,采用了 M1 与 M2 两面腔镜构成谐振腔。其中, M1 为凹面镜,曲率半径为 750 mm,表面镀有 1030 nm 高反膜,反射率达到 99.8%; M2 为平面镜,对 1030 nm 激光部分透过,透过率为 60%。输出激光从 M2 出射,经过分光镜分光后,射入激光功率计(PM, OPHIR NOVAII/30K-W-BB-74)进行功率测试。图 4 给出了激光输出功率随吸收的泵浦功率变化的曲线,从中可以看出,输出功率随吸收泵浦功率接近线性增长,当吸收的泵浦功率达到 9.57 kW 时,最大输出功率达到 6.2 kW。经计算可知,当输出功率达到最大时,光光效率为 64.8%,斜率效率高达 72.1%。此时,功率曲线的斜率并未展现出下降趋势,这表明当泵浦功率进一步增大,输出功率也会以与之前相同的斜率增长。

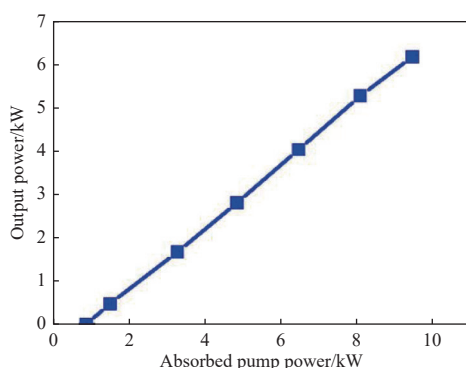
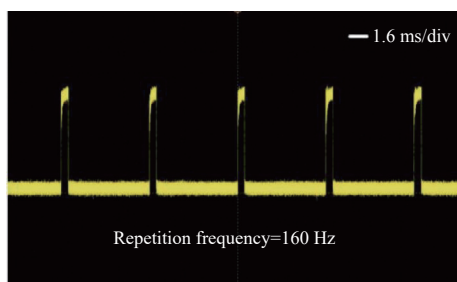


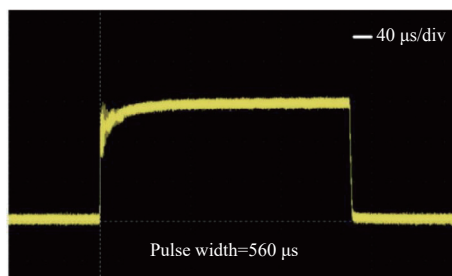
图4 Yb:YAG 陶瓷板条激光装置输出功率随吸收的泵浦功率变化的曲线

Fig. 4 Output power of Yb:YAG ceramic slab laser setup versus absorbed pump power

图 5 给出了准连续波运转的 Yb:YAG 陶瓷板条激光典型的波形图,激光重复频率为 160 Hz,与泵浦脉冲的重复频率相同,脉冲宽度为 560 μ s, 占空比约为 9%。测试输出激光的中心波长和半高宽,结果如图 6 所示,输出激光的中心波长为 1030 nm,半高宽为 0.9 nm。



(a) 重复频率为 160 Hz 的脉冲序列



(b) 脉冲宽度为 560 μ s 的脉冲轮廓

图5 Yb:YAG 陶瓷板条激光装置典型的示波器波形

Fig. 5 Typical oscilloscope trace of QCW pulse Yb:YAG ceramic slab laser setup

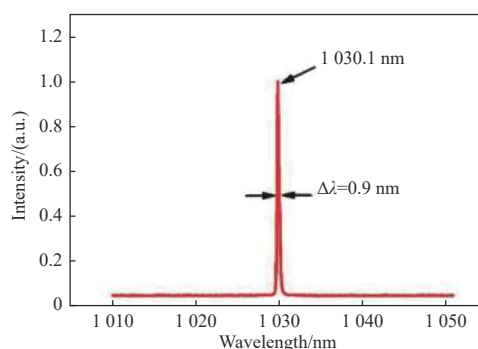


图6 Yb:YAG 陶瓷板条激光装置测量波长

Fig. 6 Measured wavelength of Yb:YAG ceramic slab laser at full output power

在上述研究的基础上,我们进一步使用上海硅酸盐研究所研制的更大尺寸、更高掺杂浓度的 Yb:YAG 陶瓷样品,研制了 10 kW 级的 Yb:YAG 陶瓷板条激光模块,其结构图如图 7 所示。板条同样采用梯形结构,板条尺寸为 174.5 mm×66 mm×6.6 mm,其中上大面为 158.2 mm×66 mm。板条掺杂浓度为 0.8 at.%,板条端面与侧面切角,均与 6.2 kW 级板条相同,且侧面仍进行打毛处理。与 6.2 kW 级板条不同的是,板条上大面依旧镀有泵浦光 940 nm 增透膜,而下大面则镀有泵浦光 940 nm 高反膜,使得泵浦光经由上大面入射后,通过下大面进行反射从而实现双程吸收提高泵浦光的吸收效率。在激光运行过程中,为了评价激光板条模块产生高功率高光束质量激光输出的潜力,使用了一束波长 632.8 nm 的平行光束,从陶瓷板条的一个端面射入,并沿着与输出激光相同的“之字形”路径进行传输,单次通过正在运行的板条并从板条的另一个端面射出。出射的参考红光光束,经过分光镜 M3 后,被反射至一系列探测器中,以获得单次通过板条的参考光红光光束的波前畸变等参数,用以评价 Yb:YAG 陶瓷板条激光模块输出高功率

高光束质量激光的潜力。

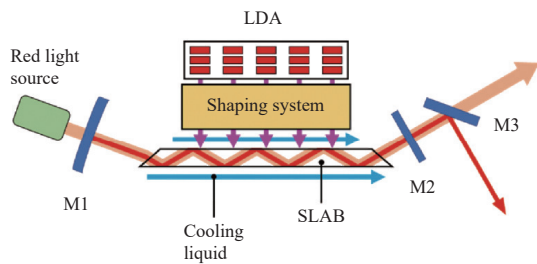


图7 10 kW级 Yb:YAG 陶瓷板条激光装置示意图

Fig. 7 Structure diagram of Yb:YAG ceramic slab(10 kW class) laser setup

使用上述大尺寸 Yb:YAG 陶瓷板条激光模块进行出光实验,其输出功率随吸收的泵浦光功率变化的曲线如图8所示。由图中可知,当吸收的泵浦功率达到 16.4 kW 时,其输出功率达到 9.85 kW,此时 Yb:YAG 陶瓷板条激光器的光光效率达到 60%,斜率效率约为 65.3%。从图中也可以看出,激光的中心波长为 1030 nm,半高宽为 0.9 nm。

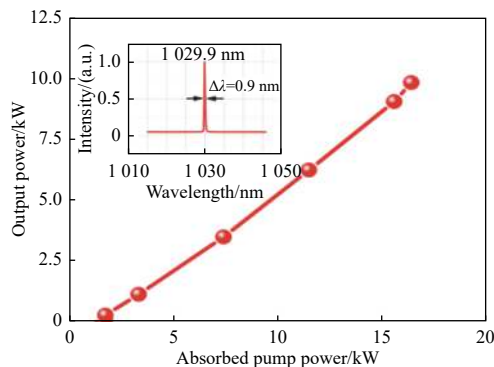


图8 10 kW级 Yb:YAG 陶瓷板条激光振荡器功率曲线 (插图为波长测量结果)

Fig. 8 Measured output power of Yb:YAG ceramic slab (10 kW class) laser versus absorbed pump power (inset measured wavelength at full output power)

图9展示了探测红光在激光最高输出功率时,经由聚焦系统聚焦所得的远场光斑的光强分布,经由该分布计算所得的光束质量 β 因子为 3.7 倍衍射极限。探测红光在进入聚焦系统并由 CCD 相机探测远场光斑的同时,也被分光并由波前传感器进行波前分布的探测,图10给出了探测红光的波前分布图。在最高功率输出时,测得的波前畸变峰谷(PV)值为 $2.8 \mu\text{m}$,其分布呈现出中间部分较高,上下边缘部分较低的情况。首先,我们已经测试板条激光模块在不出光情况下的波前分布,以验证板条加工误差等因素对波前分布的影响,

结果显示波前分布较均匀。为了更好地分析原因,我们对板条的温度分布进行了有限元仿真。仿真结果显示,沿着板条宽度方向的温度分布,其规律与所探测的波前分布相似,这说明了板条探测光波前畸变可能主要由板条内热效应引起。

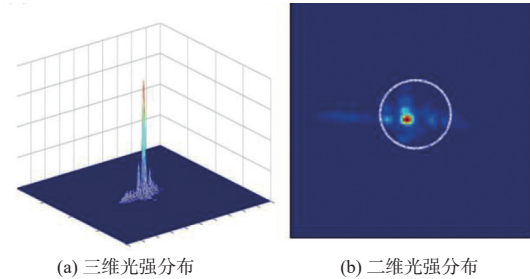
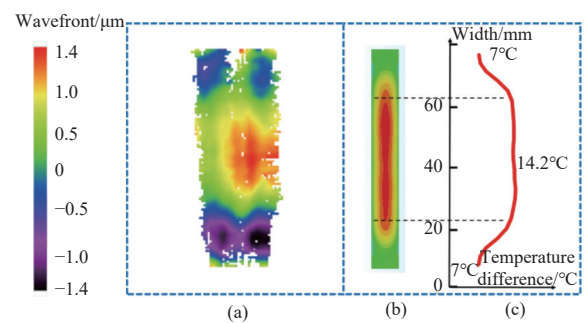


图9 测得的探测光远场光斑光强分布

Fig. 9 Far-field intensity distribution of probe beam measured under full output power



(a) 波前传感器测量的波前畸变; (b) 板条中间截面二维温度分布模拟结果; (c) 最大泵功率下沿中截面中心线的温升分布模拟结果

图10 波前分布图

Fig. 10 Wavefront distribution map

3 结论

本文报道了本课题组近年来在高功率陶瓷板条激光方面的主要研究进展: 1) 研制出了平均功率达 4.35 kW 的 Nd:YAG 陶瓷板条脉冲激光器, 激光脉冲宽度为 $160 \mu\text{s}$, 重复频率为 400 Hz; 2) 研制出了平均功率达 9.8 kW 的 Yb:YAG 陶瓷板条脉冲激光器, 激光脉冲宽度为 $560 \mu\text{s}$, 重复频率为 160 Hz, 光光转换效率为 60%。这些结果表明, 大尺寸激光陶瓷是实现高功率、高光束质量、高效率固体激光的重要增益介质。

参考文献:

- [1] KRISHNAJA D, CHEEPU M, VENKATESWARLU D. A review of research progress on dissimilar laser weld-brazing of automotive applications[C]//Microelectronics

- Systems Education IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. [S. l.]: [s. n.], 2018: 012073.
- [2] SALAMIN Y I, HARMAN Z, KEITEL C H. Direct high-power laser acceleration of ions for medical applications[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(15): 155004-1-4.
- [3] XU Y T, XU J L, CUI Q J, et al. High efficiency multi-kW diode-side-pumped Nd: YAG laser with reduced thermal effect[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, 27(2): 024201-1-3.
- [4] 李鹏举, 潘登, 刘顺利. 长焦连续立方相位板的飞秒激光加工与性能测试[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(17): 2088-2093.
- LI Pengju, PAN Deng, LIU Shunli. Continuous cubic phase plate with long depth of focus fabricated by femto-second laser and its optical performance[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(17): 2088-2093.
- [5] 胡林亭, 李佩军, 姚志军. 提高外场重频激光光斑测量距离的研究[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(12): 1137-1142.
- HU Linting, LI Peijun, YAO Zhijun. Improvement of the measuring distance of repetitive-frequency laser spot in field[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(12): 1137-1142.
- [6] MARTIN W S, CHENOCH J P. Multiple internal refraction face pumped laser: US3633126[P]. 1972-01-04.
- [7] 朱广志, 朱晓, 朱长虹, 等. LD侧边抽运板条激光器的热效应[J]. *中国激光*, 2009, 36(1): 37-42.
- ZHU Guangzhi, ZHU Xiao, ZHU Changhong, et al. Thermal effect study of LD edge-pumped slab lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(1): 37-42.
- [8] MACHAN J P, LONG M H, ZAMEL J J, et al. 5.4 kW diode-pumped, 2.4×diffraction-limited Nd: YAG laser for material processing[C]// OSA Topical Meeting on Advanced Solid State Lasers. OSA: [s. n.], 2002: 549.
- [9] INJEYAN H, GOODNO G D. High power laser handbook [M]. New York: McGraw-Hill Education, 2011: 187-204.
- [10] 李霞, 刘宏, 王继扬, 等. 钇铝石榴石透明激光陶瓷的研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2004, 32(4): 485-489.
- LI Xia, LIU Hong, WANG Jiyang, et al. Progress in transparent polycrystalline aluminum-yttrium garnet laser ceramic[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2004, 32(4): 485-489.
- [11] 杨昊霖, 陈玥, 贾富, 等. 强陶瓷激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(7): 142-162.
- YANG Haolin, CHNE Yue, JIA Fu, et al. Research progress in ceramic lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 142-162.
- [12] 李江, 田丰, 刘子玉. 中红外激光陶瓷的研究进展与展望[J]. *人工晶体学报*, 2020, 49(8): 1467-1487.
- LI Jiang, TIAN Feng, LIU Ziyu. Research progress and prospect of mid-infrared laser ceramics[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2020, 49(8): 1467-1487.
- [13] SOKOL M, KALABUKHOV S, KASIYAN V, et al. Mechanical, thermal and optical properties of the SPS-processed polycrystalline Nd: YAG[J]. *Optical Materials*, 2014, 38(7): 204-210.
- [14] KAMINSKII A A, AKCHURIN M S, GAINUTDINOV R V, et al. Microhardness and fracture toughness of Y_2O_3 - and $Y_3Al_5O_{12}$ -based nanocrystalline laser ceramics[J]. *Crystallography Reports*, 2005, 50(5): 569-873.
- [15] IKESUE A, KINOSHITA T, KAMATA K, et al. Fabrication and optical properties of high-performance polycrystalline Nd: YAG ceramics for solid state lasers[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, 78(4): 1033-1040.
- [16] LU J, UEDA K, YAGI H, et al. Neodymium doped yttrium aluminum garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) nanocrystalline ceramics-A new generation of solid state laser and optical materials[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2002, 341(1/2): 220-225.
- [17] YAMAMOTO R M, BHACHU B S, CUTTER K P, et al. The use of large transparent ceramics in a high powered, diode pumped solid state laser[J]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2008(4): 27-30.
- [18] 雷小丽, 孙玲, 刘洋, 等. 达信公司百千瓦陶瓷激光器技术综述[J]. *激光与红外*, 2011, 41(9): 948-952.
- LEI Xiaoli, SUN Ling, LIU Yang, et al. Laser with 100 kW output power developed by the Textron company[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(9): 948-952.
- [19] 陈亚辉, 周勇, 宗楠, 等. 国产Nd: YAG透明陶瓷实现10.0 W激光输出[J]. *中国激光*, 2007, 34(5): 660.
- CHEN Yahui, ZHOU Yong, ZONG Nan, et al. Domestic Nd: YAG transparent ceramics realize 10.0W laser output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(5): 660.
- [20] LI C Y, BO Y, WANG Y B, et al. A kilowatt level LD-side-pumped QCW Nd: YAG ceramic laser[J]. *Optics Communications*, 2010, 283: 5145-5148.
- [21] SHEN Y, BO Y, ZONG N, et al. Experimental and theoretical investigation of pump laser induced thermal damage for polycrystalline ceramic and crystal Nd: YAG[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(1): 160-167.