

文章编号 1004-924X(2018)10-2407-08

Yb : LuScO₃ 晶体的超精密光学加工及其激光性能

沈冯峰^{1,2}, 徐学科^{1,3*}, 高文兰³, 于浩海⁴, 张 龙¹, 邵建达^{1,2}

(1. 中国科学院 上海光学精密机械研究所 强激光材料重点实验室, 上海 201800;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 上海恒益光学精密机械有限公司, 上海 201800;

4. 山东大学 晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100)

摘要: Yb : LuScO₃ 晶体作为固体激光器的新型增益介质, 其面形和表面质量严重影响激光器的光束质量, 因此探索 Yb : LuScO₃ 晶体的超精度光学加工工艺参数具有重要意义。本文系统开展了 Yb : LuScO₃ 晶体超精密光学加工的工艺参数研究, 针对 Yb : LuScO₃ 晶体在加工过程中容易破裂和表面质量较差的问题, 提出了拼接上盘和树脂铜盘抛光垫的关键技术。首先, 使用 COMSOL Multiphysics 有限元软件对拼接工艺中选取的不同保护垫料的应力进行仿真。接着, 研磨阶段逐步减小 B₂C 磨料的粒径。然后, 粗糙阶段使用树脂铜盘作为抛光垫, 并对树脂铜盘抛光垫的作用进行了分析。最后, 使用激光二极管泵浦加工好的样品进行激光输出实验。实验结果表明: 基于该技术加工后的晶体表面粗糙度 RMS=0.296 nm, 面形精度 PV=53 nm。在 1 086 nm 处获得了 8.3 W 的连续激光输出, 斜效率为 58%。该加工方法可以广泛应用于 Yb : LuScO₃ 晶体的高精度加工。

关键词: 光学加工; Yb : LuScO₃; 表面面形; 表面粗糙度; 树脂铜盘

中图分类号: O614.346; TG580.692 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182610.2407

Ultra-precision optical manufacture and laser performance of Yb : LuScO₃ crystal

SHEN Feng-feng^{1,2}, XU Xue-ke^{1,3*}, GAO Wen-lan³, YU Hao-hai⁴, ZHANG Long¹, SHAO Jian-da^{1,2}

(1. Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Shanghai Hengyi Optics and Fine Mechanics Co., Ltd, Shanghai 201800, China;

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

* Corresponding author, E-mail: xuxk@siom.ac.cn

Abstract: Yb:LuScO₃ crystal is a new type of gain medium used in solid-state lasers. The surface profile and surface quality of the Yb:LuScO₃ crystal affect the characteristics of the output laser beam significantly. Therefore, it is extremely important to explore the processing parameters for its ultraprecision optical manufacture. In this paper, a systematic study of the processing parameters for the optical

收稿日期: 2018-03-21; 修订日期: 2018-04-25.

基金项目: 科技部增材制造与激光制造重点专项 (No. 2016YFB1102300)

manufacture of Yb:LuScO₃ crystal was reported. To solve issues related to the brittleness of the Yb:LuScO₃ crystal and the poor quality of the generated surface, the key technology of stitching and the use of copper resin pads were proposed. First, the stress due to different protective paddings was simulated using COMSOL Multiphysics software and the size of abrasive B₄C particles was continually decreased during the stitching and lapping stages, respectively. Next, copper resin pads were used during the stage of rough polishing, and their function was explained. Finally, the output power of the continuous wave laser was achieved by diode-pumping the finely polished Yb:LuScO₃ crystal. The results reveal a final surface roughness of 0.296 nm (root mean square value) and surface accuracy of 53 nm(peak-to-valley value). An output power of 8.3 W and a slope efficiency of 58% were obtained using a diode laser pump source at a wavelength of 1 086 nm. This method can be widely used for the high-precision machining of Yb:LuScO₃ crystals.

Key words: optical manufacture; Yb : LuScO₃ ; surface profile; surface roughness; copper resin pad

1 引 言

高功率固体激光器以其卓越的性能在工业、生活、科研和军事领域展现出非常广阔的应用前景。钇铝石榴石(Y₃Al₅O₁₂, YAG)晶体材料由于具有较高的热导率、优秀的光学性质和激光性能,从而成为高功率固体(板条^[1-2]、碟片^[3-5])激光器中应用较为广泛的增益介质。与最常用的YAG激光晶体相比,稀土倍半氧化物激光晶体具有更大的热导率、更宽的发射带宽以及更低的声子能量,因此具备实现更大功率、更高效激光输出的潜力^[6]。常用稀土倍半氧化物晶体主要包括氧化钇(Y₂O₃)、氧化钪(Sc₂O₃)、氧化镨(Lu₂O₃)及其化合物(Lu_xSc_{2-x}O₃, Y_xSc_{2-x}O₃, Lu_xY_{2-x}O₃等系列晶体)^[7]。目前, Yb³⁺, Nd³⁺, Tm³⁺和 Er³⁺等激光离子掺杂已实现,获得了晶体1~3 μm的高功率连续激光和飞秒激光输出,并在雷达探测和人眼安全激光等领域表现出良好的发展前景^[8-9]。关于稀土倍半氧化物系列晶体材料的研究主要集中在晶体生长、光谱特性和激光性能等方面^[10-12]。

Yb:LuScO₃晶体是一种新型激光晶体,也是获得超短脉冲锁模激光的激光晶体材料^[13-14],其加工难度比以YAG为代表的常规硬脆晶体材料要大,主要体现在以下两个方面:(1) Yb:LuScO₃晶体的熔点为2 400 °C,应力较大,加工过程容易崩边、破碎;(2) Yb:LuScO₃晶体的莫氏硬度为6.5,属于相对软质的脆性材料^[8],加工过程容易产生表面/亚表面缺陷,加工后表面质量

较差^[15]。因此,探索Yb:LuScO₃晶体的超精密加工技术对高功率激光器的发展有着重大的促进作用。本文根据Yb:LuScO₃晶体的加工特点,对不同阶段的加工参数进行了研究,最后使用激光二极管泵浦Yb:LuScO₃晶体进行连续激光输出实验,实现了Yb:LuScO₃晶体的超精密光学加工。

2 实 验

2.1 晶体加工工艺实验

采用上海恒益精密机械有限公司研制的传统单轴机对Yb:LuScO₃晶体进行加工。晶体采用光学浮区法生长^[16], Yb³⁺的原子百分含量为1%。实验样品尺寸为4 mm×4 mm×4 mm。使用J5060B型内圆切割机把毛坯晶体切割成要求的形状并留足一定的加工尺寸余量。采用拼接的方式进行加工,样品周围的保护垫料为YAG晶体,4块YAG晶体的尺寸均为16 mm×12 mm×4 mm,如图1所示。晶体加工全流程包括研磨、粗抛和精抛。在研磨阶段,研磨液由牡丹江金刚钻碳化硼有限公司生产的粒径分别为40, 20和10 μm的B₄C散粒磨料和去离子水混合而成,质量百分比分别为15%, 10%, 10%。粗抛采用三种方案。方案一:抛光液由10 μm氧化铈(CeO₂)抛光粉和去离子水混合而成,质量百分比为5%;方案二:抛光液由UNIVERSAL PHOTONICS公司生产的粒径为3.0 μm的金刚石微粉和去离子水混合而成,质量百分比为2%;方案三:抛光液为3.0 μm的金刚石微粉(质量百分比为2%)。

精抛实验中,抛光液由 UNIVERSAL PHOTON-ICS 公司生产的粒径为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 抛光粉和去离子水混合而成,质量百分比为 2%,结合 4 # 沥青抛光模进行精密抛光,以提高表面光洁度与面形精度。具体的实验参数见表 1。

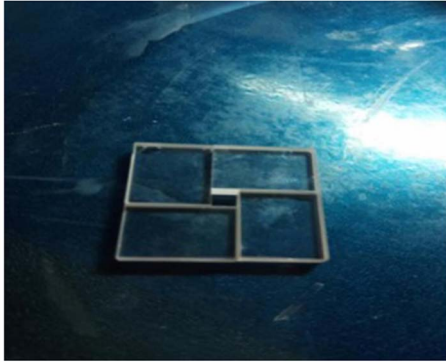


图 1 Yb:LuScO₃ 晶体的拼接

Fig. 1 Stitching of Yb:LuScO₃ crystal

采用 HUVIJZ-HRM3000 型光学显微镜观察每道加工工序完成后晶体表面的宏观损伤。ZYGO-MST633 型斐索式干涉仪测量样品表面的面形精度,采用波长为 $632.8\ \text{nm}$ 的氦氖激光作为光源。ZYGO-NW8050 型白光轮廓仪用来测量加工过程中样品的表面粗糙度。

测试晶体每一道工序加工后的表面粗糙度,观察和分析表面微观损伤。每一次更换研磨辅料或抛光粉,都需要用超声波清洗样品,避免污染损伤表面。

表 1 不同阶段的实验参数

Tab. 1 Experimental parameters in different stages

	磨料	研抛垫	粒径/ μm	时间/ min	速度/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	压力/ g
研 磨	B ₁ C	铸铁盘	40	20	35	1500
	B ₁ C	铸铁盘	20	30	35	1000
	B ₁ C	铸铁盘	10	30	35	500
粗 抛	CeO ₂	聚氨酯	10	120	30	500
	金刚石微粉	聚氨酯	3.0	120	30	500
	金刚石微粉	树脂铜盘	3.0	120	30	500
精 抛	Al ₂ O ₃	沥青	0.1	120	25	250
	Al ₂ O ₃	沥青	0.1	120	25	250

2.2 激光输出实验

采用精抛工艺加工后的样品直接进行激光输

出实验。在连续激光输出实验中,泵浦源是北京国科世纪激光技术有限公司生产的 GKFCM-808-30-10 型光纤耦合激光二极管,泵浦功率为 30 W,其发射的中心波长为 $808\ \text{nm}$,通过焦距 $50\ \text{mm}$ 的耦合透镜将泵浦光聚焦到晶体表面。谐振腔采用平凹腔结构,如图 2 所示。输入镜 M₁ 为凹面镜,靠近泵浦端一面镀制 $808\ \text{nm}$ 高透膜,另一面镀制对 $808\ \text{nm}$ 高透射同时对振荡光 $1\ 080\sim 1\ 020\ \text{nm}$ 高反膜。激光晶体紧靠泵浦端镜 M₁ 放置。输出镜 M₂ 为平面镜,靠近腔内一面镀制对 $1\ 020\sim 1\ 080\ \text{nm}$ 部分透过膜,对振荡光的透过率为 3%。采用 Melectron 公司生产的 EPM2000 型功率计测量激光输出功率,Ocean Optics 公司的 HR4000CG-UV-NIR 型光谱仪测量输出激光的波长。

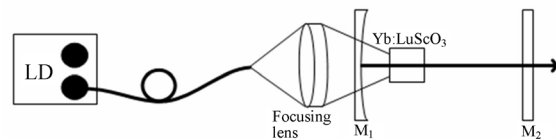


图 2 激光输出实验装置图

Fig. 2 Framework of setup for laser output experiment

3 实验结果

3.1 样品加工实验

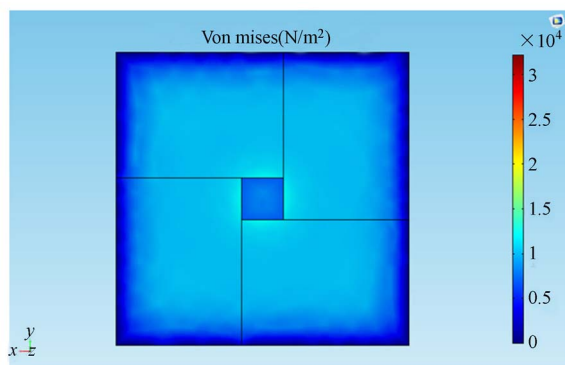
为了防止样品在加工过程中产生塌边、翘边或者样品边缘因受力不均匀而导致崩边等边缘效应,采用拼接上盘的加工工艺。样品四周粘上保护垫料,可以保证均匀的去除率。实验过程中对比了 K9 玻璃和 YAG 晶体两种保护垫料。使用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 分别对拼接后的样品表面应力进行仿真,仿真建模需要知道 3 种材料的杨氏模量、泊松比和密度,如表

表 2 应力仿真模型参数

Tab. 2 Parameters of stress simulation model

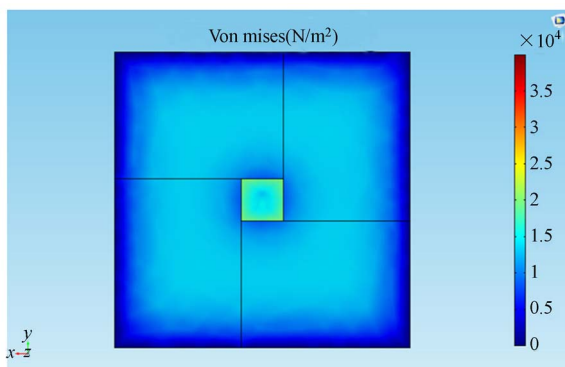
材料	杨氏模量/ GPa	泊松比	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
YAG	310	0.3	4.56
Yb:LuScO ₃	180	0.3	3.85
K9	76	0.2	2.54

2 所示。仿真模型中采用均布载荷,载荷值为 $1.8 \times 10^4 \text{ N/m}^2$,设置拼接后的整块样品的 4 个侧面和接触抛光垫的底面为固定约束,即位移为 0。图 3 是仿真结果,两种材料作为保护垫料,中间样品的应力分布不一样。图 3(b)是样品和保护垫料 K9 拼接的应力仿真结果。从图 3(b)中可以看出,拼接后样品边缘所受应力较大,这样并不能防止加工过程中样品因受力不均匀而导致的崩边。K9 相对于样品要软,K9 玻璃的去除率比样品大,整个平面容易形成中间高四周低的高光圈。图 3(a)是样品和 YAG 晶体拼接的应力仿真结果。样品和 YAG 晶体拼接,整个平面的应力分布均匀,不会产生崩边破碎的边缘效应,可以实现材料的均匀去除。经过仿真分析,最后优选 YAG 晶体作为样品拼接的保护垫料。



(a) 保护垫料为 YAG 的应力图

(a) Contour of stress when using YAG as protective padding



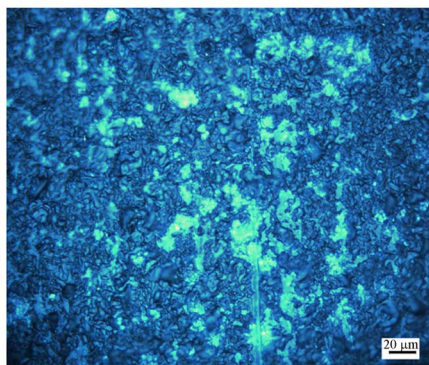
(b) 保护垫料为 K9 的应力图

(b) Contour of stress when using K9 as protective padding

图 3 两种保护垫料的应力图

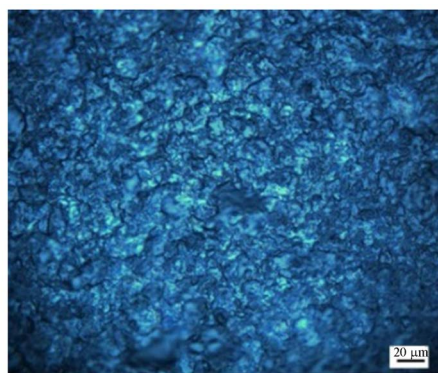
Fig. 3 Contour of stress for using two kinds of protective padding

研磨的目的一方面是调整晶体的形状和尺寸精度,适合加工要求;另一方面是去除切割工艺所带来的缺陷损伤。通过光学显微镜观察未研磨和分别经过 40, 20 和 10 μm 粒径的 B_4C 散粒磨料研磨后样品的表面形貌,如图 4 所示。由图 4 可知:晶体表面未研磨时,表面存在较多的损伤和刀



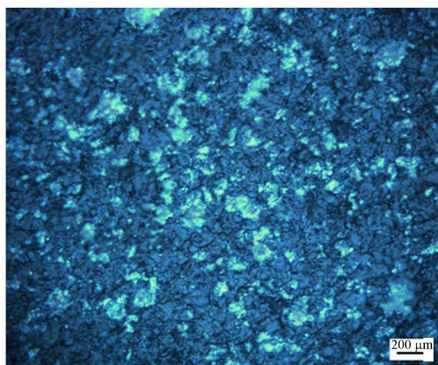
(a) 未研磨时样品表面形貌

(a) Micrograph of sample without lapping



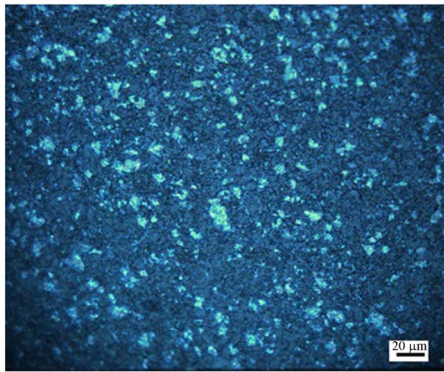
(b) 粒径为 40 μm 的 B_4C 研磨后样品的表面形貌

(b) Micrograph of sample lapped by 40 μm B_4C abrasive



(c) 粒径为 20 μm 的 B_4C 研磨后样品的表面形貌

(c) Micrograph of sample lapped by 20 μm B_4C abrasive



(d)粒径为 10 μm 的 B₄C 研磨后样品的表面形貌

(d)Micrograph of sample lapped by 10 μm B₄C abrasive

图 4 未研磨和不同粒径的 B₄C 研磨后样品的表面形貌图

Fig. 4 Micrographs of sample after lapping using B₄C abrasives with different grain sizes

片划伤。随着磨粒粒径的减小,加工后样品的表面划痕、凹坑等表面缺陷减少。由表 1 可知,随着磨料粒径的减小,研磨时间不断增加,研磨压力不断减小,目的是使样品表面研磨得更加均匀,使样品的面形变化不大。各研磨工序阶段的去除深度与表面粗糙度如表 3 所示。

表 3 不同粒径的 B₄C 研磨后样品的去除深度和表面粗糙度
Tab. 3 Removal depth and surface roughness of samples lapped using B₄C abrasives with different grain sizes

研磨	粒径/μm	去除深度/mm	表面粗糙度/nm
B ₄ C	40	0.2	442
B ₄ C	20	0.14	309
B ₄ C	10	0.1	130

采用逐级减小 B₄C 磨料粒径研磨后,样品表面仍然有很多微小宏观损伤难以去除。粗抛选取了 3 种方案,如表 1 所示,分别为 CeO₂ 和聚氨酯抛光垫,金刚石微粉和聚氨酯抛光垫,金刚石微粉和树脂铜盘抛光垫。表 4 为样品在粗抛阶段的去除深度。

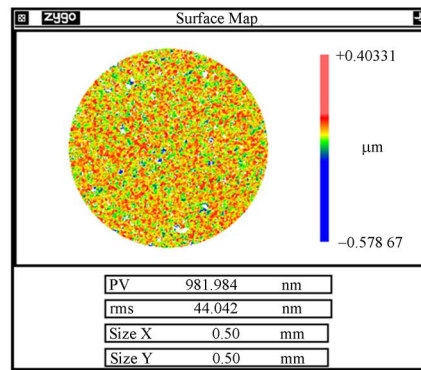
CeO₂ 抛光粉抛光两小时后的样品表面形貌如图 5(a)所示,样品表面出现大量麻点。肉眼观察下,样品表面模糊,抛得不够透亮。针对 CeO₂ 抛光后的问题,采用粒径为 3.0 μm 的金刚石微粉和聚氨酯抛光垫进行抛光,两小时后抛光表面透亮,肉眼观察样品表面,出现大量划痕,如图 5(b)

所示。金刚石微粉的莫氏硬度较大,在去除材料的同时,也会划伤样品表面。图 5(c)是使用 3.0 μm 粒径的金刚石微粉抛光和树脂铜盘抛光垫进行实验后样品的表面形貌。与图 5(b)相比,样品表面的划痕深度减小,表面损伤明显减少。由图 5(c)可知,样品表面粗糙度 RMS 值为 7.641 nm。

表 4 样品在粗抛阶段的去除深度

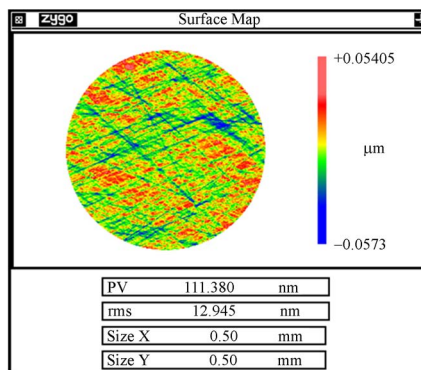
Tab. 4 Removal depth of samples in rough polishing stage

粗抛	粒径/μm	去除深度/mm
CeO ₂	10.0	0.02
金刚石微粉	3.0	0.01
金刚石微粉	3.0	0.01



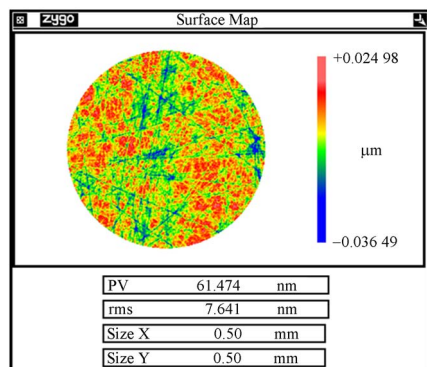
(a)样品经过 CeO₂ 和聚氨酯抛光垫粗抛后的表面形貌图

(a) Micrograph of sample after rough polishing using CeO₂ abrasives and polyurethane



(b)样品经过金刚石微粉和聚氨酯抛光垫粗抛后的表面形貌

(b) Micrograph of sample after rough polishing using diamond powder and polyurethane



(c) 样品经过金刚石微粉和树脂铜盘抛光垫粗抛后的表面形貌

(c) Micrograph of sample after rough polishing using diamond powder and cooper resin pad

图 5 样品在粗抛阶段的表面形貌

Fig. 5 Micrographs of sample in rough polishing

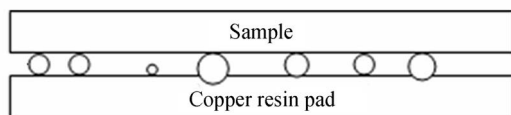


图 6 金刚石微粉与树脂铜盘、样品的接触示意图

Fig. 6 Contact scheme of diamond powder with copper resin pad and sample

抛光垫在化学机械抛光过程中起着重要作用。粗抛过程中,采用高效树脂铜盘抛光垫不仅能够快速去除样品在研磨过程中产生的缺陷层,而且使得晶体获得较好的表面质量,并为耦合下一道加工工序提供良好的面形精度^[17]。采用游离金刚石颗粒对样品进行加工时,理想状态是金刚石颗粒的粒径相差不大,这样就可以使压力均匀地分散在金刚石颗粒上。但如果有较大粒径的金刚石颗粒进入树脂铜盘中,由于铜盘比较软,大粒径的金刚石颗粒可以嵌入到树脂铜盘中,树脂铜盘可以对大粒径的金刚石颗粒起到缓冲作用,这样可以使大粒径的金刚石颗粒与磨料处于同等高度,避免大颗粒划伤样品表面,提高加工表面质量,金刚石微粉和树脂铜盘、样品三者之间的接触变形如图 6 所示。

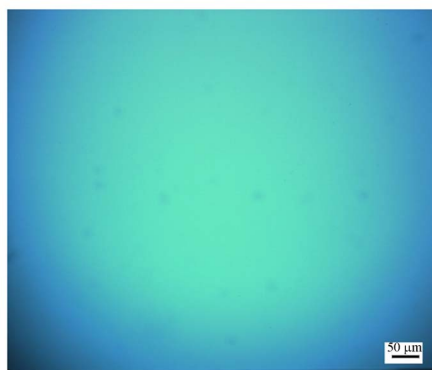
粗抛阶段已获得较好的表面光洁度和一定精度的表面粗糙度,采用金刚石微粉进行粗抛时表面磨削的主要作用都是机械作用,所以表面会有划痕等缺陷。精抛阶段采用中位粒径为 $0.1 \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 抛光液和 4 # 沥青抛光模。由表 1 可

知,精抛阶段的总时间为 4 小时。前 2 小时抛光后,在 200 倍显微镜下,晶体表面存在微量的细小亮路和少量麻点,并无其他不良现象,如图 7(a) 所示。因此,后 2 小时里,不改变工艺参数,继续抛光。图 7(b) 是样品精抛 4 小时后的表面形貌图。从图中可以看出,样品表面无任何麻点和划痕,达到加工要求。图 8 是样品经过精抛后的面形精度和表面粗糙度。由图 8 可知,样品整体抛光表面的面形精度为 0.084λ , 小于 $\lambda/10$, 表面粗糙度 RMS 值为 0.296 nm 。由沥青制成的抛光模具有良好的吻合性和一定的机械性能,加工的样品表面疵病等级高,满足激光级加工要求,可用于激光输出实验的增益介质。



(a) 样品经过精抛 2 小时后的表面形貌

(a) Micrograph of sample after fine polishing for two hours

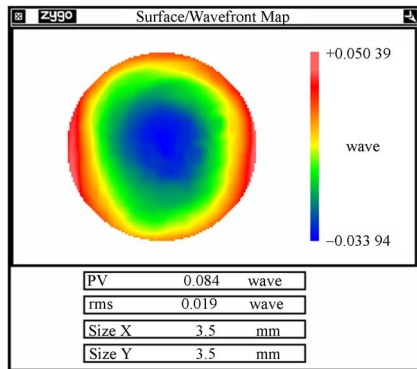


(b) 样品经过精抛 4 小时后的表面形貌

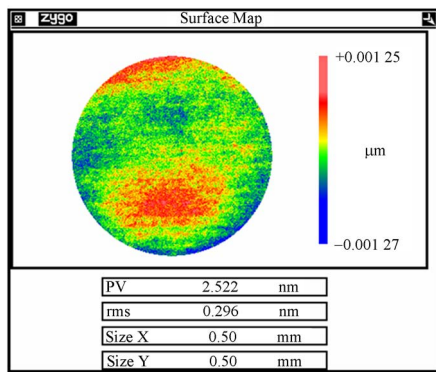
(b) Micrograph of sample after fine polishing for four hours

图 7 样品经过精抛后的样品表面形貌

Fig. 7 Micrographs of sample after fine polishing



(a) 样品经过精抛后的面形精度
(a) Surface accuracy of sample after fine polishing



(b) 样品经过精抛后的表面粗糙度
(b) Surface roughness of sample after fine polishing

图 8 精抛后样品的面形精度和表面粗糙度

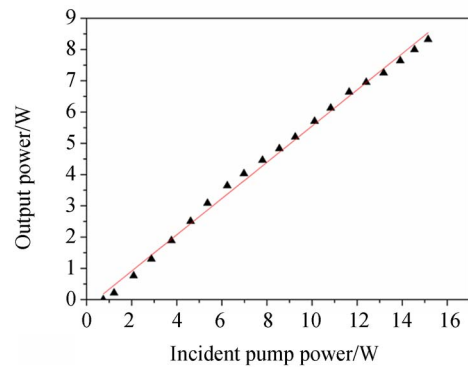
Fig. 8 Surface accuracy and surface roughness of sample after fine polishing

3.2 激光输出实验

对精抛工艺加工的样品进行激光输出实验,样品未镀膜。样品输出 1 086 nm 激光的输出功率与入射抽运功率的关系如图 9 所示。由图 9(a)可知,输出功率随着入射抽运功率的增加而增加;在 15.2 W 的入射抽运功率下,获得了输出功率为 8.3 W、斜效率为 58% 的激光输出。若样品经过镀膜并进一步优化腔镜,会有更好的激光输出结果。

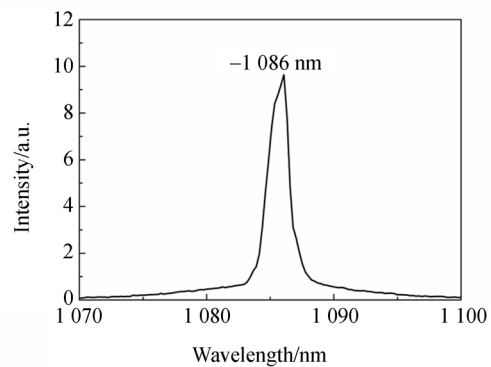
4 结 论

本文开展了以 YAG 激光晶体为代表的硬脆材料加工工艺参数的研究,并提出使用拼接和树脂铜盘关键技术,结合 COMSOL Multiphysics 有



(a) 1 086 nm 波长位置处激光输出功率与入射抽运功率的关系

(a) Output power versus incident pump power when using fine polished Yb : LuScO₃ crystal at wavelength of 1 086 nm



(b) 输出激光光谱图

(b) Emission spectrum of laser

图 9 精抛后样品的激光性能图

Fig. 9 Performance of laser when adopting fine polished Yb : LuScO₃ crystal

限元仿真软件,解决了 Yb : LuScO₃ 晶体因受力不均匀而导致的破裂等表面质量问题。加工后样品的表面平面度优于 $\lambda/10$ ($\lambda=632.8$ nm),表面粗糙度 RMS 值优于 0.3 nm,实现了 Yb : LuScO₃ 晶体的超精密加工。经连续激光输出实验验证,基于该工艺加工的 Yb : LuScO₃ 晶体,其连续激光输出斜效率可达 58%,再次证明了该工艺可以实现增益介质的超精密加工。

致谢:

感谢山东大学晶体材料国家重点实验室提供的 Yb : LuScO₃ 晶体。

参考文献:

- [1] RUTHERFORD T S, TULLOCH W M, SINHA S, *et al.*. Yb : YAG and Nd : YAG edge-pumped slab lasers [J]. *Optics Letters*, 2001, 26 (13): 986-988.
- [2] 李隆,董武威,史鹏,等. 激光二极管阵列侧泵浦 Nd : YAG 板条的热效应[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16 (11): 2121-2126.
- LI L, DONG W W, SHI P, *et al.*. Thermal effect of diode bar side-pumped Nd : YAG slab [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2121-2126. (in Chinese)
- [3] INNERHOFER E, SÜDMEYER T, BRUNNER F, *et al.*. 60-W average power in 810-fs pulses from a thin-disk Yb : YAG laser[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(5): 367-369.
- [4] RUSSBUELDT P, MANS T, ROTARIUS G, *et al.*. 400 W Yb : YAG innoslab fs-amplifier[J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 12230-12245.
- [5] ZHANG J, MAK K F, GRÖBMEYER S, *et al.*. 270 fs, 30-W-level Kerr-lens mode-locked Ho : YAG thin-disk oscillator at 2 μm [J]. *Nonlinear Optics*, 2017: NTu3A. 2.
- [6] PETERMANN K, HUBER G, FORNASIERO L, *et al.*. Rare-earth-doped sesquioxides[J]. *Journal of Luminescence*, 2000, 87:973-975.
- [7] PETERMANN K, FORNASIERO L, MIX E, *et al.*. High melting sesquioxides: crystal growth, spectroscopy, and laser experiments[J]. *Optical Materials*, 2002, 19(1): 67-71.
- [8] HEUER A M, SARACENO C J, BEIL K, *et al.*. Efficient OPSL-pumped mode-locked Yb : Lu₂O₃ laser with 67% optical-to-optical efficiency [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19090.
- [9] PETERMANN V, FAGUNDES-PETERS D, JOHANNSEN J, *et al.*. Highly Yb-doped oxides for thin-disc lasers[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, 275(1): 135-140.
- [10] KRANKEL C. Rare-earth-doped sesquioxides for diode-pumped high power lasers in the 1, 2, and 3 μm spectral range[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21 (1): 250-262.
- [11] MUN J H, JOUINI A, NOVOSELOV A, *et al.*. Thermal and optical properties of Yb³⁺-doped Y₂O₃ single crystal grown by the micro-pulling-down method[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(7): 5885-5888.
- [12] FORNASIERO L, MIX E, PETERS V, *et al.*. New oxide crystals for solid state lasers[J]. *Crystal Research and Technology*, 1999, 34(2):255-260.
- [13] BAER C R, KRÄNKEL C, HECKL O H, *et al.*. 227-fs pulses from a mode-locked Yb : LuScO₃ thin disk laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17 (13): 10725-10730.
- [14] SCHMIDT A, PETROV V, GRIEBNER U, *et al.*. Diode-pumped mode-locked Yb : LuScO₃ single crystal laser with 74 fs pulse duration[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(4): 511-513.
- [15] ONG N S, VENKATESH V C. Semi-ductile grinding and polishing of Pyrex glass[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 83(1): 261-266.
- [16] 郝良振. 掺钕氧化镱激光晶体生长及其性能研究 [D]. 山东:山东大学, 2012.
- HAO L ZH. *Growth and Properties of Nd: Lu₂O₃ Laser Crystal*[D]. Shandong: Shandong University, 2012. (in Chinese)
- [17] 王柳. 蓝宝石抛光树脂铜盘的制备及其性能研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2015.
- WANG L. *The Prepare and the Performance Research of Copper Resin for Lapping Sapphire* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)

作者简介:



沈冯峰(1992-),男,江苏南通人,2015年于盐城师范学院获得学士学位,主要从事倍半氧化物晶体超精密光学加工方面的研究。E-mail: shenfengfeng@siom.ac.cn

导师简介:



徐学科(1976-),男,安徽金寨人,博士,研究员,硕士生导师,2006年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事超精密光学元件的加工及检测技术方面的研究。E-mail: xuxk@siom.ac.cn