

激光与光电子学进展

基于光胶工艺的薄片连续激光器技术研究

石玉森^{1,3}, 潘雪^{1*}, 张鹏², 肖奇¹, 李祖强^{1,3}, 王江峰¹, 姜有恩¹, 范薇¹, 李学春^{1**}, 朱健强¹¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;²张江实验室, 上海 201210;³中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 研究了薄片激光器中晶体与热沉的封装技术和核心技术,采用薄片晶体与金刚石热沉的光胶工艺,自主设计并研制了 5 mm 口径的 YAG/Yb:YAG 复合薄片激光模块,分析了该薄片激光模块的多通泵浦系统,建立了晶体热效应数值仿真模型,实验测量了在 2.2 kW/cm² 泵浦功率密度、940 nm 泵浦波长下薄片晶体的热焦距为 445.6 mm;采用基于光胶工艺封装的薄片激光模块搭建连续激光器,在 70 W 泵浦功率下获得了 18.75 W 功率的基横模输出,斜率效率和光光转换效率分别为 36.59% 和 26.79%。

关键词 激光器; 薄片激光器; 多通泵浦; 热效应; 连续激光器

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231134

Technologies of Thin-Disk Continuous Wave Laser Based on Optical Adhesive

Shi Yusen^{1,3}, Pan Xue^{1*}, Zhang Peng², Xiao Qi¹, Li Zuqiang^{1,3}, Wang Jiangfeng¹,
Jiang Youen¹, Fan Wei¹, Li Xuechun^{1**}, Zhu Jianqiang¹¹Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;²Zhangjiang Laboratory, Shanghai 201210, China;³Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China

Abstract We study the packaging method and key technologies of thin-disk laser, and report on our home-made thin-disk module comprising a YAG/Yb:YAG composite thin-disk crystal with 5 mm diameter, which is glued onto a diamond heat sink. The multi-pass pumping scheme of the thin-disk module is analyzed and a numerical simulation model of thermal effect is established. The thermal focal length of the thin-disk crystal is measured to be approximately 445.6 mm at pump power density of 2.2 kW/cm² and pump wavelength of 940 nm. A continuous wave laser based on the thin-disk module is realized and it delivers fundamental mode output of 18.75 W at the pump power of 70 W. The slope efficiency and optical-to-optical efficiency are 36.59% and 26.79%, respectively.

Key words lasers; thin-disk lasers; multi-pass pump; thermal effect; continuous wave laser

1 引言

1994年, Giesen等^[1]首次提出薄片激光器的概念,将激光增益介质设计成薄片状(厚度为 100~200 μm),并采用端面泵浦背面冷却的换热方式。相

比传统的棒状和板条固体增益介质,薄片增益介质的热效应显著减弱。薄片激光器优良的特性使其非常适合产生高平均功率、高峰值功率和高光束质量的激光。目前,基于薄片激光技术的激光系统已广泛应用于科研和工业领域^[2-3]。

收稿日期: 2023-03-21; 修回日期: 2023-04-22; 录用日期: 2023-04-27; 网络首发日期: 2023-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(11604350)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA25020307, XDA25020103)、上海市自然科学基金(20ZR1464800)

通信作者: *pxll33@siom.ac.cn; **lixuechun@siom.ac.cn

德国通快公司 (Trumpf GmbH) 于 2020 年研制出有着 10 kW 近基横模输出的薄片连续激光系统, 该系统产生的光束质量因子 (M^2) 为 1.76、光光转换效率为 51%^[4]。2022 年, 德国 D+G 公司 (Dausinger+Giesen GmbH) 研制了 80% 光光转换效率的千瓦级薄片连续激光器^[5], 其光光转换效率是目前报道的薄片连续激光器所能实现的最高值。在薄片再生放大技术研究上, 2019 年德国通快公司将再生放大器输出的平均功率扩展到 1.9 kW, 重复频率为 20 kHz^[6], 是目前报道的薄片再生放大器所能实现的最高平均功率。2016 年德国马克斯波恩研究所 (Max Born Institute) 的 Jung 等^[7]研制的薄片再生放大器实现 100 Hz 重复频率下 300 mJ 单脉冲能量的输出, M^2 为 1.04, 是目前报道的薄片再生放大器输出的最高单脉冲能量。在以上研究中, 薄片激光模块 (TDM) 均使用高热导率的金刚石作为热沉, 并采用光胶工艺将薄片晶体与金刚石热沉粘结。

在国内针对薄片激光器核心技术的研究中, 华中科技大学朱晓课题组提出基于共轭双抛物面镜的多通泵浦方案^[8-10], 采用薄片晶体与热沉的焊接工艺, 自主研发了大口径的薄片激光模块。基于其自研薄片激光模块, 朱晓团队实现了 96 W 平均功率、100 kHz 重复频率的纳秒级再生放大输出^[11], 以及 253 W 平均功率、10.4 ns 脉冲宽度、100 kHz 重复频率的腔倒空 Q 输出^[12]。中国科学院大连化学物理研究所的李刚课题组应用多孔碳化硅泡沫的冷却技术^[13-14], 同样采用薄片晶体与热沉的焊接工艺, 自主研发了大口径的薄片激光模块, 实现了 150 W 平均功率、18.38 ns 脉冲宽度、100 kHz 重复频率的腔倒空 Q 输出^[15], 以及 450 W 泵浦功率下 210 W 功率的近衍射极限连续输出^[16]。

目前光胶工艺和焊接工艺均已广泛应用在薄片晶体与热沉的连接上, 考虑到光胶工艺可以避免焊接工艺中薄片增益晶体的损坏, 透明的胶层和热沉可以降低连接层材料因吸收荧光和放大的自发辐射光 (Amplified spontaneous emission, ASE) 而产生的热量, 因此本课题组针对光胶工艺进行研究。采用光胶工艺对薄片晶体与金刚石热沉进行粘结, 自主设计并

研制了小口径的 YAG/Yb:YAG 复合薄片激光模块。该模块采用基于单抛物面镜和转折直角棱镜的 24 程多通泵浦方案和基于金刚石热沉背面冷却的热管理方案, 模块中薄片晶体前表面直径为 5 mm、厚度为 1 mm, Yb:YAG 厚度为 0.24 mm、掺杂摩尔分数为 10%, 薄片前表面镀有 940 nm 和 1030 nm 的增透膜, 后表面镀有 940 nm 和 1030 nm 的高反膜。

本文分析了自研薄片激光模块的多通泵浦系统的泵浦分布和吸收效率, 其次给出了晶体热效应数值仿真模型的仿真结果, 实验测量了晶体温度场和热致光程差 (Optical path difference, OPD), 其与仿真结果基本一致; 采用基于光胶工艺封装的薄片激光模块搭建平凹稳定腔的连续激光器, 实现了稳定的基横模和多横模激光输出。

2 薄片激光模块的关键技术

2.1 多通泵浦系统

由于激光增益介质很薄, 对单次通过的泵浦光的吸收效率很低。斯图加特大学的研究人员提出^[17], 中继成像结构可以增加泵浦光通过增益介质的次数, 从而提高泵浦光的吸收效率。目前多通泵浦结构经过演化与优化, 有 3 种基本结构: 基于单抛物面镜、多组转折棱镜构建的单抛物面上光斑环形排列 (ADSP) 方案^[17]和单抛物面上光斑横向排列 (RDSP) 方案^[18], 基于共轭双抛物面镜构建的双抛物面上光斑横向排列 (RDDP) 方案^[8-9]。本课题组自主设计并研制的 24 程多通泵浦系统, 采用单抛物面镜、两对直角棱镜和 0° 回射反射镜构建的单抛物面上光斑环形排列方案。

由光纤耦合半导体激光器输出的多边形平顶泵浦光束经过准直透镜组后平行出射, 通过抛物面镜和转折直角棱镜组多次成像于 YAG/Yb:YAG 复合薄片晶体表面。所采用的半导体激光器输出功率为 70 W, 薄片晶体表面泵浦光斑直径为 2 mm, 则泵浦功率密度约为 2.2 kW/cm²。图 1(a) 给出自研薄片激光模块在泵浦光加载时的实物图, 24 程泵浦光斑良好地叠加在一起。另外, 由图 1(a) 可知, 多通泵浦系统内转折直角棱镜的法线与水平和垂直方向存在夹角, 泵浦光束

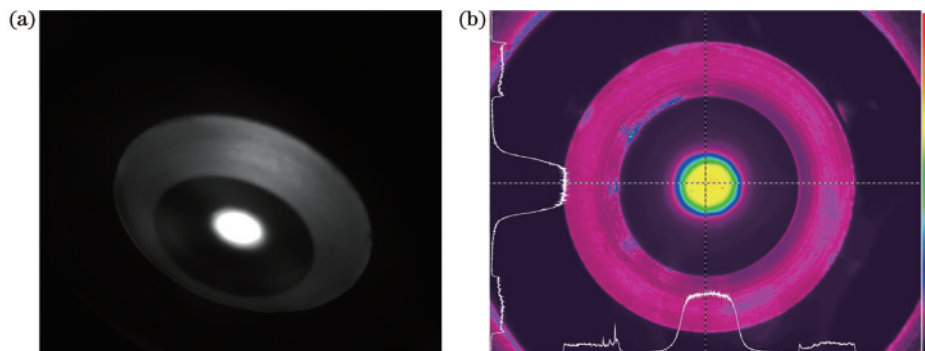


图 1 自研模块中薄片晶体表面泵浦分布。(a) 实物图; (b) 荧光成像图

Fig. 1 Pump distribution on the surface of thin-disk crystal in our home-made module. (a) Photography; (b) imaging of fluorescence

每次入射薄片晶体时都会旋转一定角度,导致 24 程泵浦光斑不能完全重合,其四周呈现出模糊的效果。从图 1(b)也可以看出,多边形泵浦光束叠加后光斑形成了边缘不规则的形状。图 1(b)为 70 W 泵浦功率时薄片晶体表面的泵浦分布,泵浦光斑近似呈超高斯分布。泵浦光斑直径在水平和竖直方向存在区别,呈现类似于“椭圆”的形态,是因为泵浦光束的倾斜入射以及多角度入射。

忽略多通泵浦系统中抛物面镜、转折直角棱镜和薄片晶体等元件对泵浦光束的反射损耗,以及泵浦光束倾斜入射导致薄片晶体中泵浦光束的光程变化,多通泵浦系统的吸收效率 $\eta_{\text{abs}}^{[19]}$ 可表示为

$$\eta_{\text{abs}} = 1 - \exp(-M_p d \sigma_{\text{abs}} N_{\text{ion}} f_b), \quad (1)$$

式中: M_p 为泵浦光束通过薄片晶体的程数; d 为薄片晶体厚度; σ_{abs} 为激活离子在泵浦波长下的吸收截面面积; N_{ion} 为激活离子体密度; f_b 为漂白因子,表征常温时激光下能级存在粒子数分布,为使掺杂晶体对泵浦光无吸收而损耗的反转粒子数比例。

薄片激光模块采用掺杂摩尔分数为 10% 的 Yb:YAG 复合薄片晶体,根据式(1)可以计算得到不同晶体厚度下泵浦吸收效率与泵浦程数之间的关系曲线,结果如图 2 所示。由图 2 可知,在同一晶体厚度下,随着泵浦程数的增加,吸收效率增加但增速降低。泵浦程数达到一定值后,吸收效率达到饱和。同一泵浦程数下,晶体越厚吸收效率越高。当泵浦程数为 24 程时,掺杂晶体厚度为 240 μm 和 360 μm 的吸收效率大于晶体厚度为 120 μm 的吸收效率,并且当掺杂晶体厚度为 240 μm 和 360 μm 时,两者的吸收效率基本相当。但晶体越厚,其热透镜和热畸变效应越严重。当

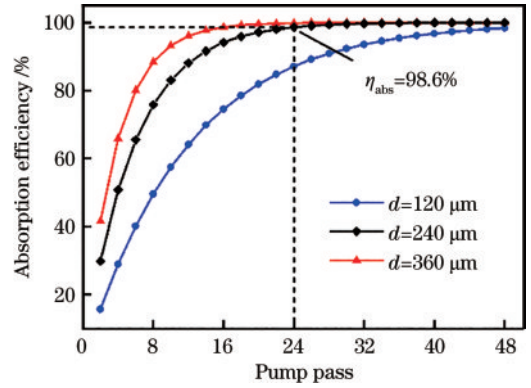


图 2 不同泵浦程数下泵浦吸收效率
Fig. 2 Pump absorption efficiency at different pump passes

掺杂晶体厚度为 240 μm 时,薄片增益介质对泵浦光的吸收效率已达 98.6%,因而自研的 24 程多通泵浦系统采用了厚度为 240 μm 的 Yb:YAG 晶体。

2.2 薄片晶体热效应分析

在 TMD 中,薄片晶体后表面通常固定在热沉前表面上,冷却液由热沉后表面带走薄片晶体产生的热量。这种热管理方案意味着可以采用较“激烈”的强化换热技术,如射流冲击冷却技术。薄的晶体、较薄的热沉减小了热传导路径和热阻,极大地提高了强化换热的效率,使得薄片晶体内仅存在一维的、与光束传播方向平行的热梯度,而与光束传播方向垂直的热梯度可以忽略^[3],这有效降低了热透镜、热畸变等效应,提高激光的光束质量。

建立薄片热效应的有限元分析模型^[20-21],对 TMD 进行高效传热优化设计。当泵浦功率为 70 W 时,薄片晶体的温度场如图 3(a) 所示。在热效应数值仿真模

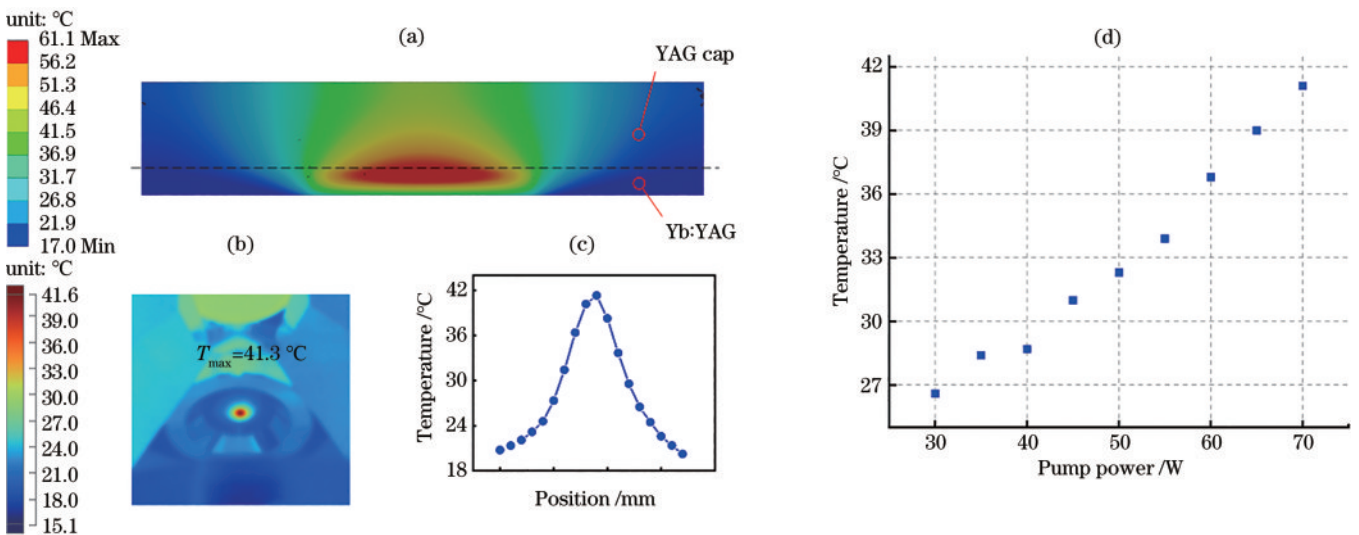


图 3 薄片晶体温度场分析。(a) 轴向温度场仿真结果;(b) 温度测量结果;(c) 晶体前表面温度测量曲线;(d) 晶体前表面最高温度与泵浦功率测量结果

Fig. 3 Analysis of temperature in thin disk crystal. (a) Simulated result of axial temperature; (b) measured result of temperature; (c) temperature profile on the front crystal surface; (d) measured maximum temperature on the front crystal surface with increasing pump power

型中,为提高单元网格质量和模型计算效率,将圆台状的薄片晶体简化为圆柱状,同时保证模型简化不影响仿真结果。图 3(a)为 YAG/Yb:YAG 复合薄片晶体沿轴线截面内的温度场分布,可以看到 Yb:YAG 晶体温度自轴线沿径向变化起始较缓,呈现超高斯分布。薄片晶体内最高温度为 61.1 °C,其位于 Yb:YAG 晶体内部并且接近 YAG 端帽和 Yb:YAG 晶体的界限,同时晶体前表面的最高温度为 44.4 °C。在薄片激光模块的 70 W 泵浦功率实验中,热像仪的测量结果如图 3(b)、图 3(c)所示。薄片晶体前表面最高温度约为 41.3 °C,仿真结果与实验结果的误差来源于简化的薄片晶体的泵浦生热模型、薄片晶体与热沉的中间层建模以及热像仪的测量等。图 3(c)为薄片晶体前表面的温度测量曲线,受测量方式自身的影响,难以精准地确定温度测量点对应的位置坐标。但可以看出晶体前表面温度呈高斯分布,原因是 YAG 端帽的存在使温度分布从 YAG/Yb:YAG 分界面处的超高斯分布逐渐转换为高斯分布。晶体前表面最高温度与泵浦功率关系曲线如图 3(d)所示,在低泵浦功率下晶体前表面最高温度随泵浦功率的增加呈线性增长,但当泵浦功率较高时温度增长趋势略微加快。

通过热效应数值仿真模型计算薄片晶体在热载荷下的温度场和形变场分布,从而计算薄片晶体的热致 OPD^[22-24],其具体可表示为

$$f_{\text{OPD}} = 2 \int_0^d \frac{dn}{dT} \Delta T(r, z) dz + 2 \cdot \frac{2\pi}{n_0} \left(\frac{n_0^2 + 2}{3} \right)^2 \Delta \alpha \cdot \Delta N(r) d + 2[-n_0 \Delta z_{\text{HR}}(r) + (n_0 - 1) \Delta z_{\text{AR}}(r)], \quad (2)$$

式中: f_{OPD} 为热致 OPD 的值; r, z 分别为径向和轴向坐标,倍数 2 表示光束经过两次反射通过薄片晶体;等号右边第一项表征热光效应导致的波前畸变, dn/dT 为晶体的热光系数, $\Delta T(r, z)$ 为给定空间位置处的温度变化值;等号右边第二项表征由于激活离子极化强

度变化引起折射率变化导致的波前畸变,其中 n_0 为晶体折射率, $\Delta \alpha$ 为粒子数反转引起的极化强度变化量, $\Delta N(r)$ 为给定位置处的反转粒子数体密度;等号右边第三项表征晶体前后表面形变导致的波前畸变, $\Delta z_{\text{HR}}(r)$ 、 $\Delta z_{\text{AR}}(r)$ 分别为晶体后表面和前表面上在给定径向位置处的形变量。

当泵浦功率为 70 W 时,将薄片晶体的温度场和形变场数据代入式(2),考虑到激光器基横模运转时填充因子(模式尺寸与泵浦尺寸之比)约为 70%~85%,计算直径为 1.4 mm 的内薄片晶体热致 OPD 及各组分分量的分布,如图 4 所示。由图 4(a)可知,总的热致 OPD 呈现正透镜的聚焦效应,其峰谷(PV)值和均方根(RMS)值仿真结果分别为 0.484 λ 和 0.140 λ (λ 为波长 1030 nm)。热致 OPD 的球面部分对应焦距值的计算结果为 492.4 mm。由图 4(b)可知,热光效应导致的 OPD、晶体前后表面形变导致的 OPD 和激活离子极化强度变化导致的 OPD 均呈现正透镜的聚焦效应,三者 PV 值占热致 OPD 的 PV 值比例分别为 60.72%、36.84% 和 2.45%。激活离子极化强度变化引起的 OPD 变化远小于热光效应和晶体表面形变导致的 OPD。因为 OPD 的仿真口径为 1.4 mm,小于泵浦光斑口径(2 mm),且泵浦光束为超高斯分布,所以计算区域内激活离子极化强度变化引起的折射率相对变化很小。

为测量薄片晶体的波前变化,搭建波前测量装置^[25],对薄片晶体的反射面型进行测量,装置结构如图 5 所示。其中参考反射镜(RM)采用 $\lambda/10$ 面型精度的平面反射镜。波前测量装置中,扩束器(BE)和软边光阑(SA)用于产生合适口径的平顶光束,透镜 Lens 1 和透镜 Lens 2 组成第一级像传递系统,整形后的平顶光束经分光棱镜(BS)后分别成像在 RM 和 TDM 处。透镜 Lens 3 和透镜 Lens 4 组成第二级像传递系统,将 RM 和 TDM 处的测量光以合适的口径成像在波前传感器(WFS)上。

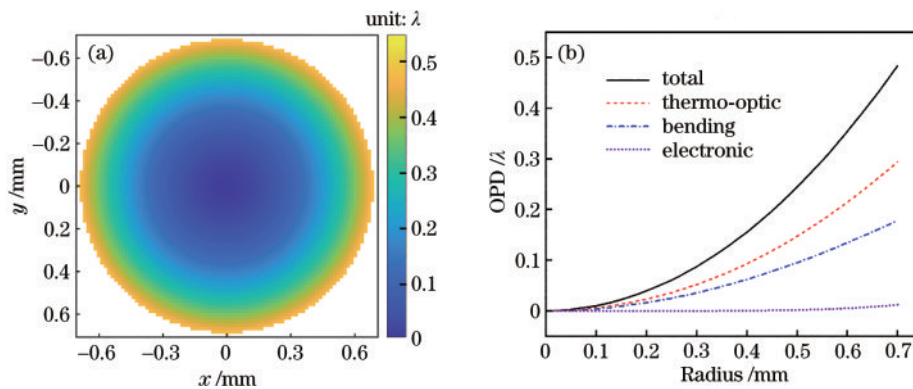


图 4 2.2 kW/cm² 泵浦功率密度下薄片晶体 OPD 仿真结果。(a) 总热致 OPD 云图;(b) 热致 OPD 及各组分分量的位置曲线
Fig. 4 Simulated results of OPD when pump power density is 2.2 kW/cm². (a) Filled contour plot of total OPD; (b) total OPD and OPD components induced by different effects for the thin disk

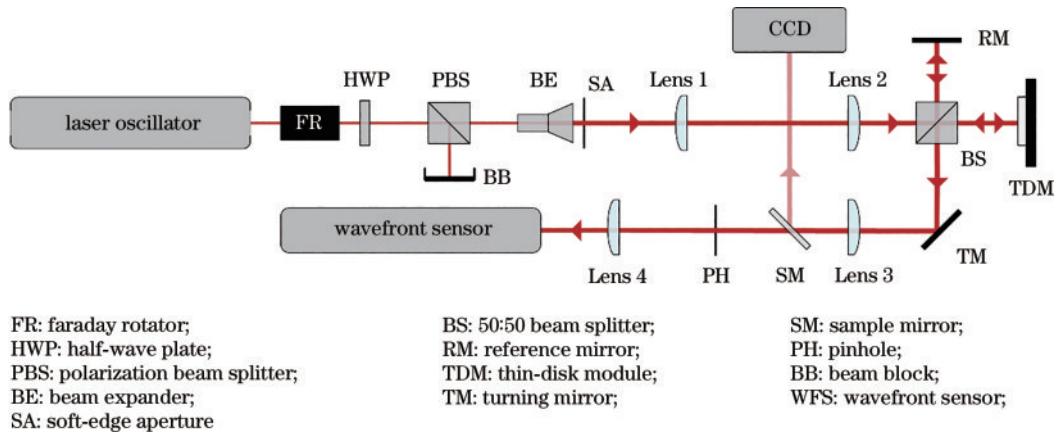


图 5 薄片晶体反射面型测量装置

Fig. 5 Deformation measurement setup of thin disk crystal

根据图 5 的波前测量装置测量薄片晶体的 OPD 变化,当无泵浦光加载时,1.4 mm 测量口径下薄片晶体总的 OPD 的 PV 值和 RMS 值分别为 0.136λ 和 0.030λ ,此时焦距的测量值为 3.22 m。逐渐增加泵浦功率,当泵浦功率密度为 2.2 kW/cm^2 时,薄片晶体热焦距的测量值为 445.6 mm。去除薄片晶体内应力和固有变形导致的 OPD 变化,即仅考虑热致 OPD,此时薄片晶体的 OPD 云图如图 6(a) 所示。由图 6(a) 可知,薄片晶体热致 OPD 同样呈现正透镜的聚焦效应,其 PV 值和 RMS 值的测量平均结果分别为 0.504λ 和 0.147λ ,热致 OPD 的球面部分对应焦距值的计算结果为

472.4 mm。热致 OPD 的 PV 值和 RMS 值的仿真与实验误差分别为 3.97% 和 4.76%,焦距值的仿真与实验误差为 4.23%。其次,实验得到了热致 OPD 与泵浦功率的关系曲线,并分解 OPD 为球面部分和非球面部分,结果如图 6(b) 所示,球面部分对应热致光焦度。由图 6(b) 可知,光焦度随着泵浦功率的增加而增加,但在泵浦功率较大时,增速也增大,图 3(d) 也得出同样的结论。原因是薄片激光模块采用了厚度为 1 mm 的 YAG/Yb:YAG 复合晶体,泵浦功率较大时,较厚的晶体加重了其内部的热梯度,导致了更强的热透镜效应。

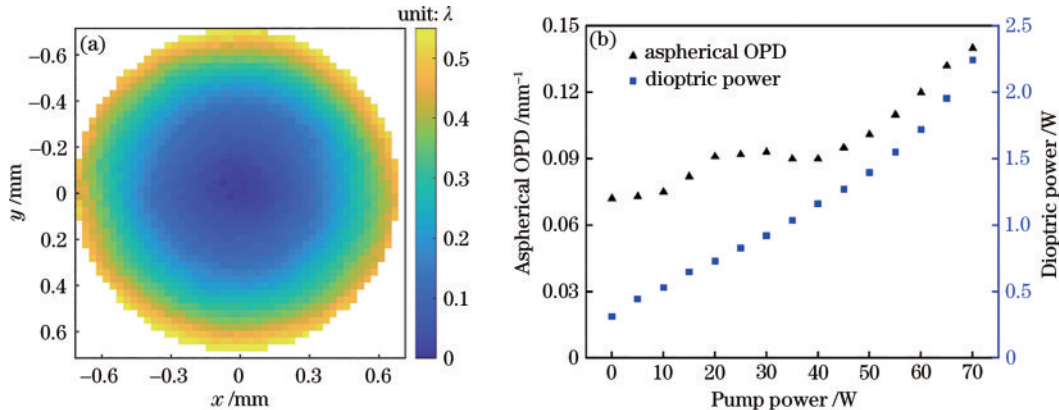


图 6 薄片晶体 OPD 测量结果。(a) 2.2 kW/cm^2 泵浦功率密度下薄片晶体热致 OPD 测量云图;(b) 光焦度、非球面畸变(PV 值)与泵浦功率的实验关系曲线

Fig. 6 Measured OPD results of the thin disk crystal. (a) Filled contour plot of total thermal OPD for the thin disk when pump power density is 2.2 kW/cm^2 ; (b) the measured dioptric power and aspherical aberration (PV) with increasing pump power

3 薄片连续激光输出

根据图 5 的波前测量装置已测得薄片激光模块在 70 W 泵浦功率下热焦距为 445.6 mm,水平和垂直方向的热焦距分别为 479.8 mm 和 415.9 mm。采用特定透过率的平面反射镜,与薄片激光模块搭建简单的 I 型平凹谐振腔,薄片晶体作为一侧端镜,平面反射镜作为另一端镜同时作为输出镜,谐振腔光路如图 7(a)

所示。薄片晶体与平面反射镜相距 450 mm,即薄片晶体的热焦点近似位于平面反射镜处。根据 Contag^[19] 的理论计算谐振腔端镜的最佳输出耦合率,当泵浦功率密度为 2.2 kW/cm^2 时数值计算结果如图 7(b) 所示,其中 L 为不计端镜输出耦合率时得到的腔内往返损耗因子。图 7(b) 中的虚线表征当腔内往返损耗因子不同时,谐振腔的光光转换效率最高值所对应的端镜输出耦合率,即最佳输出耦合率。由图 7(b) 可知,在同

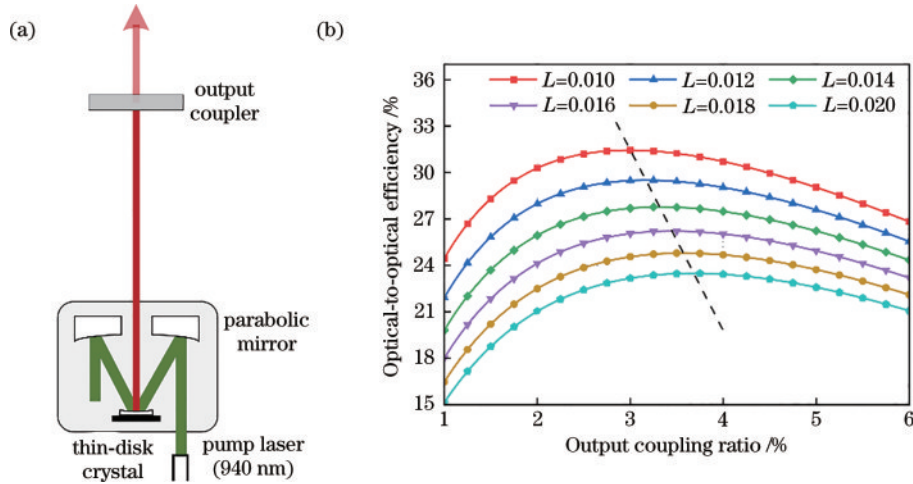


图 7 薄片连续激光器设计。(a)薄片激光器示意图;(b)不同腔内往返损耗因子下光光转换效率与端镜输出耦合率的关系曲线
Fig. 7 Design of the thin-disk continuous wave laser. (a) Schematic of the thin-disk laser. (b) optical-to-optical efficiency as a function of coupling ratio of the end mirror with different factors for the integrated losses per round trip

一输出耦合率下,随着腔内往返损耗因子的增加,光光转换效率降低。另外,随着腔内往返损耗因子的增加,最佳输出耦合率逐渐增大。考虑到实际搭建的薄片连续激光器的腔内往返损耗因子的大小,以及部分透反膜的加工和成本等问题,采用了 3.5% 耦合率的平面输出端镜。

腔长为 450 mm 的激光器的输出功率与泵浦功率的关系如图 8 所示。当泵浦功率超过阈值 17.0 W (泵浦功率密度为 0.54 kW/cm²) 时,输出功率随泵浦功率的增加而线性增加,对应斜率效率为 36.59%。当泵浦功率为 70 W 时,输出功率为 18.75 W,对应光光转换效率为 26.79%。此时用热像仪测量薄片晶体前表面温度,最高温度约为 38 °C,相比于图 3(c) 的荧光模式(无激光振荡)下的测量结果(41.3 °C)有所降低。图 8 插图为当泵浦功率为 70 W 时输出光斑的近场分布,其呈高斯分布。

通过 ABCD 传输矩阵的方法计算谐振腔内的模

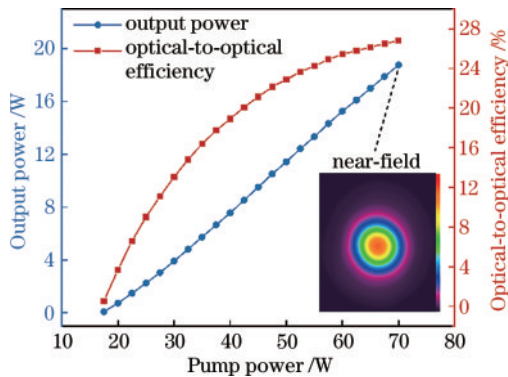


图 8 输出功率、光光转换效率与泵浦功率的关系曲线。插图: 70 W 泵浦功率时输出光斑近场分布
Fig. 8 Output power and optical-to-optical efficiency with increasing pump power. Inset: near-field pattern of laser output at 70 W pump power

式尺寸及其稳定性特征,计算结果表明,薄片晶体处水平和垂直方向的基横模模式尺寸均约为 1.09 mm,平面输出镜处水平和垂直方向的基横模模式尺寸分别为 0.79 mm 和 0.74 mm。考虑到泵浦光斑直径为 2 mm,则薄片晶体处模式光斑和泵浦光斑尺寸之比,即填充因子约为 54.4%。并且泵浦光斑呈超高斯分布,这意味着一定比例的泵浦光束能量未被模式光束提取,导致激光器输出光光转换效率偏低。

在薄片连续激光器中,泵浦光斑呈超高斯分布,即对振荡光的增益呈超高斯分布,起着类似于光阑的作用。对一般稳定球面腔而言,腔内横模模式的衍射损耗由菲涅耳数、腔几何结构和横模阶数所决定。当泵浦功率为 70 W 且谐振腔腔长为 450 mm 时,作为端镜的薄片晶体在水平和垂直方向的参数 g 分别为 0.53 和 0.46,其在水平和垂直方向的等效菲涅耳数 N_{eff} 均约为 1.08。相较于更大参数 g 和更大等效菲涅耳数 N_{eff} 的情形^[26],此时在薄片晶体处高阶横模的衍射损耗 δ_{mn} 与基横模的衍射损耗 δ_{00} 之比更大,并且基横模的衍射损耗 δ_{00} 也较大。因此,即使在填充因子仅为 54.4% 的情形下,薄片连续激光器仍呈现基横模的输出特征,而未观察到高阶横模的起振。

对平凹稳定腔而言,缩小谐振腔的腔长,可以进一步减小薄片晶体处基横模模式尺寸,即减小填充因子,并且增大薄片晶体的参数 g 和等效菲涅耳数 N_{eff} 。参数 g 的增加导致高阶横模的衍射损耗 δ_{mn} 与基横模的衍射损耗 δ_{00} 之比减小,等效菲涅耳数 N_{eff} 的增加导致基横模的衍射损耗 δ_{00} 减小,从而实现薄片激光器内高阶横模起振。数值计算模型表明,当谐振腔腔长为 270 mm、泵浦功率为 70 W 时,薄片晶体处水平和垂直方向的基横模模式尺寸分别为 0.89 mm 和 0.87 mm,平面输出镜处水平和垂直方向的基横模模式尺寸分别为 0.75 mm 和 0.71 mm,此时填充因子约为 44%。而

作为端镜的薄片晶体在水平和垂直方向的参数 g 分别为 0.72 和 0.68, 其在水平和垂直方向的等效菲涅耳数 N_{eff} 分别为 1.62 和 1.68。

调整薄片晶体与平面反射镜的距离为 270 mm, 高阶横模输出实验结果如图 9 所示。当泵浦功率超过阈值 16.8 W (泵浦功率密度为 0.53 kW/cm^2) 时, 输出功率同样随泵浦功率的增加而线性增加, 对应斜率效率为 36.25%。当泵浦功率为 110 W 时, 即泵浦功率密度为 3.5 kW/cm^2 , 输出功率为 32.8 W, 对应光光转换效率为 29.81%。此时, 用热像仪观察薄片晶体前表面温度, 最高温度约为 $52 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在低泵浦功率下, 输出光斑近场呈高斯分布, 为近基横模输出。随着泵浦功率的增加, 泵浦功率为 70 W 时高阶横模已明显起振, 输出光斑尺寸增加。当泵浦功率为 90 W 时, 输出光斑尺寸继续增加, 并且近场发生畸变。从图 6(b) 可以推测出当泵浦功率为 90 W 时, 薄片晶体的热致 OPD 中非球面部分的 PV 值可达 $\lambda/6$ 量级, 并且此时腔长较短, 使得腔内光束经历更严重的热畸变效应。当泵浦功率为 110 W 时, 输出光斑呈中心光强小、四周光强大的“圆环”状, 如图 9 中插图所示, 文献[16]的研究结果中表现出类似的近场特征。

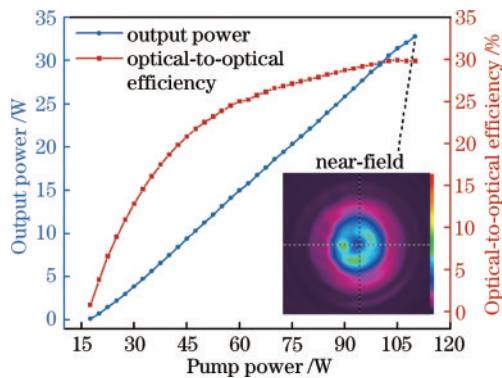


图 9 腔长减短后输出功率、光光转换效率与泵浦功率的关系曲线。插图: 110 W 泵浦功率时输出光斑近场分布

Fig. 9 Output power and optical-to-optical efficiency with increasing pump power after shortening the cavity length. Inset: near-field pattern of laser output at 110 W pump power

4 结 论

薄片激光模块作为高平均功率、高峰值功率和高光束质量激光系统中的关键器件之一, 核心技术包括薄片状激光增益介质、薄片晶体与金刚石热沉的光胶工艺、端面泵浦背面冷却的换热技术和多通泵浦技术等。研究了薄片激光模块中晶体与热沉的封装技术及其相关核心技术, 采用薄片晶体与金刚石热沉的光胶工艺, 自主研发了 5 mm 小口径的 YAG/Yb:YAG 复合薄片激光模块。数值仿真模型表明, 在 1.4 mm 口径下薄片晶体总的热致 OPD 呈正透镜效应, 其 PV 值

和对应焦距分别为 0.484λ 和 492.4 mm 。而在薄片晶体波前测量实验中, 1.4 mm 口径下薄片晶体热致 OPD 的 PV 值和焦距值的测量结果分别为 0.504λ 和 472.4 mm 。另外, 实验结果表明, 在不剔除薄片晶体内应力和固有变形导致的波前畸变情形下, 薄片激光模块在 70 W 泵浦功率下总的热焦距为 445.6 mm, 水平和垂直方向的热焦距分别为 479.8 mm 和 415.9 mm。采用平面输出反射镜与基于光胶工艺封装的薄片激光模块搭建平凹谐振腔, 在基横模输出实验中, 当泵浦功率为 70 W 时, 获得 18.75 W 的连续激光, 斜率效率和光光转换效率分别为 36.59% 和 26.79%; 通过调整腔型参数, 当泵浦功率为 110 W 时, 获得 32.8 W 的多横模连续激光, 斜率效率和光光转换效率分别为 36.25% 和 29.81%。

描述了自研的 5 mm 小口径薄片激光模块的相关研究结果, 后续准备优化薄片晶体内泵浦生热模型、完善薄片晶体与热沉的中间层模型等, 进一步完善薄片激光模块的热效应数值仿真模型。改进加工工艺和优化系统设计参数, 设计和研制更大通光口径的薄片激光模块。

参 考 文 献

- [1] Giesen A, Hügel H, Voss A, et al. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers[J]. Applied Physics B, 1994, 58(5): 365-372.
- [2] 陈飞, 于晶华, 陈毅, 等. Yb:YAG 单碟片再生放大器实现 107 mJ 激光输出[J]. 中国激光, 2023, 50(5): 0515001.
Chen F, Yu J H, Chen Y, et al. 107 mJ Yb:YAG single thin-disk regenerative amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(5): 0515001.
- [3] 郝婧婕, 刘贺言, 陈红山, 等. 克尔透镜锁模碟片激光振荡器研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(12): 1201002.
Hao J J, Liu H Y, Chen H S, et al. Progress in Kerr-lens mode-locked thin disk laser oscillators[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(12): 1201002.
- [4] Nagel S, Metzger B, Bauer D, et al. Thin-disk laser system operating above 10 kW at near fundamental mode beam quality[J]. Optics Letters, 2021, 46(5): 965-968.
- [5] Alabbadi A, Larionov M, Fink F. High-power Yb:YAG thin-disk laser with 80% efficiency pumped at the zero-phonon line[J]. Optics Letters, 2022, 47(1): 202-205.
- [6] Krötz P, Wandt C, Grebing C, et al. Towards 2 kW, 20 kHz ultrafast thin-disk based regenerative amplifiers [C]//Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C), September 29-October 3, 2019, Vienna. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2019: ATh1A.8.
- [7] Jung R, Tümmeler J, Will I. Regenerative thin-disk amplifier for 300 mJ pulse energy[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 883-887.
- [8] Huang Y, Zhu X, Zhu G Z, et al. A multi-pass pumping scheme for thin disk lasers with good anti-disturbance ability[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4605-4613.

- [9] 王海林, 董静, 陈涵天, 等. 一种多次泵浦碟片激光器: CN111934174B[P]. 2021-10-08.
Wang H L, Dong J, Chen H T, et al. Multi-pumping disc laser: CN111934174B[P]. 2021-10-08.
- [10] 李征远, 邹浩, 朱广志, 等. 基于变形镜的碟片激光器基模谐振腔动态补偿[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0814002.
Li Z Y, Zou H, Zhu G Z, et al. Dynamic compensation of fundamental mode of thin disk laser resonators based on a deformable mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0814002.
- [11] 董静, 陈涵天, 王海林, 等. 基于薄片增益介质的皮秒激光再生放大器研究[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1414003.
Dong J, Chen H T, Wang H L, et al. Research on picosecond laser regenerative amplifier based on thin-disk gain medium[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1414003.
- [12] 董静, 陈涵天, 王海林, 等. 100 kHz 腔倒空薄片激光器理论与实验研究[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0914002.
Dong J, Chen H T, Wang H L, et al. Theoretical and experimental research on 100 kHz cavity-dumped thin-disk laser[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9): 0914002.
- [13] Liu R, Tan Y, Gong F Q, et al. The application of porous foam structure cooling arrangement system for a thin disk laser[J]. Optik, 2020, 200: 163423.
- [14] 刘锐, 公发全, 李想, 等. 全固态碟片激光器的多孔泡沫热沉传热特性研究[J]. 光子学报, 2020, 49(4): 0414002.
Liu R, Gong F Q, Li X, et al. Research on heat transfer characteristics of porous foam heat sink for all solid state thin disk lasers[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4): 0414002.
- [15] Dai L H, Liu R, Li X A, et al. High-efficiency, high-repetition-rate cavity-dumped Q-switched Yb: YAG thin-disk laser based on a 72-pass pump module[J]. Optics Express, 2022, 30(11): 19629-19638.
- [16] Dai L H, Liu R, et al. Resonators with a continuously variable output coupling rate to enhance output performance of Yb: YAG thin-disk lasers[J]. Optics Express, 2022, 30(22): 40739-40749.
- [17] Erhard S, Giesen A, Karszewski M, et al. Novel pump design of Yb: YAG thin disc laser for operation at room temperature with improved efficiency[C]//Advanced Solid State Lasers, January 31-February 3, 1999, Boston, Massachusetts. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 1999: MC3.
- [18] 陈涵天, 董静, 王海林, 等. 一种具有大通光孔的碟片多程泵浦结构[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(3): 031004.
Chen H T, Dong J, Wang H L, et al. A thin-disk multi-pass pump scheme with large laser aperture[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(3): 031004.
- [19] Contag K, Karszewski M, Stewen C, et al. Theoretical modelling and experimental investigations of the diode-pumped thin-disk Yb: YAG laser[J]. Quantum Electronics, 1999, 29(8): 697-703.
- [20] 李隆, 牛娟, 张春玲, 等. 连续 LD 端面泵浦方片 YAG/Yb: YAG 复合晶体热效应分析[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(1): 0114001.
Li L, Niu J, Zhang C L, et al. Thermal effect analysis of continuous LD end-pumped square YAG/Yb: YAG composite crystal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(1): 0114001.
- [21] 李隆, 杨建花, 张春玲, 等. 脉冲 LD 端面泵浦 YAG/Nd: YAG 复合晶体热效应分析[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(21): 2114001.
Li L, Yang J H, Zhang C L, et al. Thermal effect analysis of pulsed LD end-pumped YAG/Nd: YAG composite crystal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(21): 2114001.
- [22] Aleknavičius A, Gabalis M, Michailovas A, et al. Aberrations induced by anti-ASE cap on thin-disk active element[J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14530-14538.
- [23] Tamer I, Keppler S, Hornung M, et al. Spatio-temporal characterization of pump-induced wavefront aberrations in Yb³⁺-doped materials[J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(2): 1700211.
- [24] Chi H, Baumgarten C M, Jankowska E, et al. Thermal behavior characterization of a kilowatt-power-level cryogenically cooled Yb: YAG active mirror laser amplifier[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2019, 36(4): 1084-1090.
- [25] Chyla M, Nagisetty S S, Severova P, et al. Time-resolved deformation measurement of Yb: YAG thin disk using wavefront sensor[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9343: 93431E.
- [26] 吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2003: 318-322.
Lü B D. Laser optics: beam characterization, propagation and transformation, resonator technology and physics [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003: 318-322.