

## 基于变形镜的碟片激光器基模谐振腔动态补偿

李征远<sup>1,2</sup>, 邹浩<sup>1,2</sup>, 朱广志<sup>1,2\*</sup>, 董静<sup>1,2</sup>, 王海林<sup>1,2</sup>, 朱晓<sup>1,2</sup><sup>1</sup>华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;<sup>2</sup>激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074

**摘要** 碟片激光器因具有高峰值功率与大能量等特性备受青睐,但在输出高功率激光的同时碟片晶体也极易受到热效应的影响而发生形变,致使光束质量劣化。设计并制作了一种简单的变形镜来补偿碟片晶体的光焦度变化。通过调节气室的气压,变形镜的曲率半径可以实现在 2.050 m 至  $+\infty$  之间调整。基于此变形镜,碟片激光器的工作点能够随着光焦度的改变而同步移动。碟片上的激光光斑半径在整个泵浦范围内保持不变。因此碟片激光器可以保持工作在基模而激光光束质量因子  $M^2$  从阈值至最大激光输出均不超过 1.2。

**关键词** 激光器; 变形镜; 碟片激光器; 光焦度; 基模; 补偿

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0814002

## Dynamic Compensation of Fundamental Mode of Thin Disk Laser Resonators Based on a Deformable Mirror

Li Zhengyuan<sup>1,2</sup>, Zou Hao<sup>1,2</sup>, Zhu Guangzhi<sup>1,2\*</sup>, Dong Jing<sup>1,2</sup>, Wang Hailin<sup>1,2</sup>, Zhu Xiao<sup>1,2</sup><sup>1</sup> School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;<sup>2</sup> National Engineering Research Center for Laser Processing, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** Thin disk lasers are becoming increasingly popular owing to their high peak power and pulse energy. Although high-power beams can be output by such lasers, the disk crystal is liable to deformation due to thermal effects, and the result is degraded beam quality. In this paper, a simple deformable mirror is designed and fabricated to compensate for the changes in the focal power of the thin disk crystal. The curvature radius of the deformable mirror can be changed between 2.050 m and  $+\infty$  by adjusting the pneumatic pressure in the air chamber. With the deformable mirror, the operating point of the thin disk laser can shift synchronously with the change in the focal power. The radius of the laser spot on the thin disk remains the same in the whole pump range. Consequently, the thin disk laser can operate in the fundamental mode, with the beam quality factor  $M^2$  remaining no more than 1.2 under both the threshold and the maximum laser output conditions.

**Key words** lasers; deformable mirror; thin disk laser; focal power; fundamental mode; compensation

## 1 引言

随着工业领域对高功率、高光束质量激光的需求持续加大,高亮度的固体激光器逐渐引起了学术界和工程界的兴趣与探索热情,一般来说固体激光器实现高亮度通常采用增加泵浦功率密度的方式得

以实现,而高泵浦功率密度下增益介质中的热效应导致的光束质量降低是固体激光器技术提升的主要难题。1994年,Giesen等<sup>[1]</sup>首次提出碟片激光器的概念,它将激光增益介质设计成薄片状(厚度为 100~200  $\mu\text{m}$ ,直径为 10~20 mm),并采用背面冷却的技术方式,更易获得高效而均匀的冷却。与传

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2021-10-15; 录用日期: 2021-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(61975060)

通信作者: \*zgzlaser@hust.edu.cn

统侧泵棒状激光器、端面泵浦的块状固体激光器相比,碟片激光器的热效应显著减弱,且易于通过扩大泵浦的直径来获得高输出功率、高光束质量的激光输出<sup>[1-2]</sup>。2013 年, Peng 等<sup>[3]</sup>使用 Yb:YAG 碟片激光器的简单稳定谐振腔实现了  $M^2 < 1.4$  的 1.1 kW 的输出功率。2014 年, Schad 等<sup>[4]</sup>使用连续碟片激光器在  $M^2 < 1.4$  条件下实现了约 4 kW 的输出功率。目前单碟片连续激光已经实现了 12 kW 的激光输出<sup>[5]</sup>。更大的泵浦光斑给具有更大基模体积的动态谐振腔的设计带来了巨大挑战,尤其是对于整个泵浦范围而言。另一方面,虽然碟片激光器有效地降低了激光器增益介质的热效应,但是热效应仍未完全消除,增益介质的热畸变仍然存在, Zhu 等<sup>[6]</sup>建立了相关热分析模型对其进行研究,指出碟片晶体的热畸变主要受温度梯度、轴向热应力、热致双折射及晶体形变影响,并表现为球面项和非球面项的影响。其中球面项的影响在全泵浦范围内均存在,并导致光束稳定性及光束质量的降低,可通过谐振腔的设计和相关补偿技术实现有效补偿。而非球面项部分的影响在较高泵浦功率条件下表现得尤为突出,主要引起光束质量的降低和波前的劣化。如何进一步降低和补偿这些因素的影响是碟片激光器的研究方向之一。在非球面畸变补偿方面, Piehler 等<sup>[7]</sup>使用腔内变形镜补偿 Yb:YAG 碟片晶体的非球面波前畸变并在光束质量因子  $M^2 < 1.4$  的条件下实现了 815 W 的功率输出。

在球面项引入的不稳定性矫正的技术中,为了平衡谐振腔较大的基模体积和较宽的动态稳定范围,球面变形镜的动态补偿成为不错的选择。变形镜种类较多,主要有压电陶瓷变形镜、微机械薄膜变形镜、气动或液动变形镜等<sup>[8-11]</sup>,目前已广泛应用于光学尤其是激光领域<sup>[12-13]</sup>。为了补偿激光增益介质的光焦度,从薄镜膜背面施加气压或液压的变形镜可以提供连续变化的曲率半径,这能有效降低制造成本和复杂度。这种变形镜已被提出并证明可以用于棒状激光器中热透镜效应的腔内补偿<sup>[10,14]</sup>。2017 年, Piehler 等<sup>[15]</sup>使用气动薄膜球面变形镜来提高高功率碟片激光器的输出激光光束质量,为了扩大球面形状的区域,对变形镜的厚度分布函数进行了优化。由于变形镜的厚度分布函数不是标准平面或球面,采用超声波研磨等标准技术制造成本仍然较高。

本文设计并制造了一种结构简单且成本较低的变形镜,该变形镜采用均匀厚度的熔融石英平板作

为变形的镜片,通过改变气体舱室内部的气压,实现镜片面型的连续调整。

## 2 变形镜的设计与测量

### 2.1 变形镜的设计与理论分析

球面变形镜的设计与理论分析模型如图 1 所示,半径为  $a$ 、厚度为  $h$  的熔融石英镜片粘接在金属的圆形空心支架上,熔融石英镜片的背面与支架之间形成密闭的气室,通过改变气室的压强,在镜片正反两面产生压强差,使镜片产生形变,当气室的压强小于大气压时,熔融石英镜片的面型呈凹面,反之面型呈凸面。

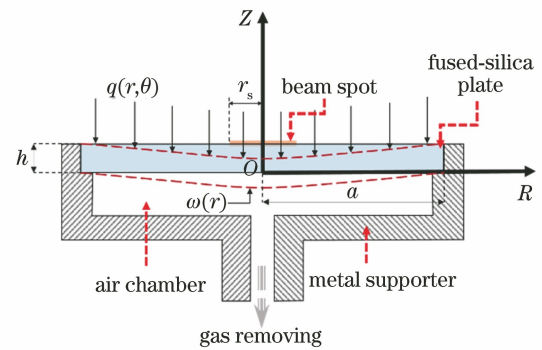


图 1 变形镜模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the deformable mirror model

当熔融石英镜片的直径厚度比大于  $10 (a/h > 10)$  时,面型的变化特性可以采用基尔霍夫薄板微扰弯曲理论进行分析,在极坐标下薄板弯曲的微分方程为

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta^2} \right) = \frac{q(r, \theta)}{D}, \quad (1)$$

式中,  $r$  表示薄板的径向坐标,  $\theta$  表示薄板的角向坐标,  $\omega$  表示薄板沿  $z$  方向的位移,  $q(r, \theta)$  表示薄板的表面载荷分布,  $D$  表示材料的弯曲刚度,其表达式为

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)}, \quad (2)$$

式中,  $h$  为薄板的厚度,  $E$  为材料的弹性模量,  $\mu$  为泊松比。当表面载荷分布为均匀载荷  $q_0$  (压强差) 时,其表达式为

$$q_0 = q_{\text{amb}} - q_{\text{ac}}, \quad (3)$$

式中,  $q_{\text{amb}}$  表示环境气压,  $q_{\text{ac}}$  表示变形镜气室气压。

可以推出薄板的形变表达式为

$$\omega(r) = \frac{q_0}{64D} (a^2 - r^2)^2 = \frac{q_0}{64D} (a^4 - 2a^2 r^2 + r^4), \quad (4)$$

式中  $a$  为薄板半径。

当  $r$  很小时,高次方项  $r^4$  可以忽略,此时圆形薄板的形变表达式近似为抛物线

$$\begin{cases} \omega(r) = \frac{q_0}{64D}a^4 - \frac{q_0}{32D}a^2r^2 \\ f = \frac{8D}{q_0a^2} \end{cases} \quad (5)$$

此时近似后的抛物线函数(5)式与薄板形变函数(4)式的偏差  $\Delta\omega(r)$  表达式为

$$\Delta\omega(r) = \frac{q_0r^4}{64D} \quad (6)$$

当  $\Delta\omega \leq \lambda/10$  时,薄板形变的面型可近似认为是球面,此时对应的薄板有效区域的半径为

$$r_s \leq \sqrt[4]{32D\lambda/(5q_0)} \quad (7)$$

而对应的有效曲率半径为

$$R = \frac{16D}{q_0a^2} \quad (8)$$

图 2 给出了熔融石英镜片厚度  $h = 0.5$  mm,半径  $a = 15$  mm 的变形镜在压强差为 0.08 MPa 时,变形镜形变的理论曲线、近似抛物面曲线以及两曲线之间的偏差曲线。可以看出,对于波长为 1030 nm 的激光,当光斑尺寸  $r_s < 3.55$  mm 时,变形镜变形曲线与标准球面的面型偏差小于  $\lambda/10$ 。因此,变形镜在该范围内的变形曲面可以认为是标准的球面面型。

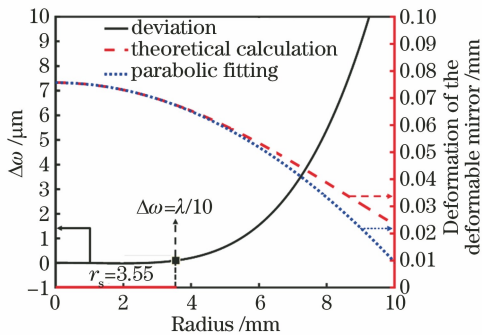


图 2 压强 0.08 MPa 时变形镜形变的理论曲线、近似抛物面曲线以及二者之间的偏差曲线(熔融石英镜片厚度  $h = 0.5$  mm, 半径  $a = 15$  mm,  $E = 76700$  N/mm<sup>2</sup>,  $\mu = 0.21$ ; 激光波长: 1030 nm)

Fig. 2 Profile change curve of the deformable mirror, the approximate parabola and the deviation curve of the two when the air chamber pressure is 0.08 MPa (fused-silica mirror thickness  $h = 0.5$  mm, radius  $a = 15$  mm,  $E = 76700$  N/mm<sup>2</sup>,  $\mu = 0.21$ ; laser wavelength: 1030 nm)

## 2.2 变形镜的制备和测量

基于上述理论分析模型,将半径 15 mm,厚度 0.5 mm 的优质熔融石英镜片粘接在铜制支座上并制作成标准变形镜。熔融石英镜片的外表面镀有 1030 nm 的高反膜,支座底部连接真空发生器(ZL112-K15GZ-DNL, Pfeiffer Vacuum, 真空发生器的精度为 0.001 MPa),变形镜及真空发生器装置实物如图 3 所示。

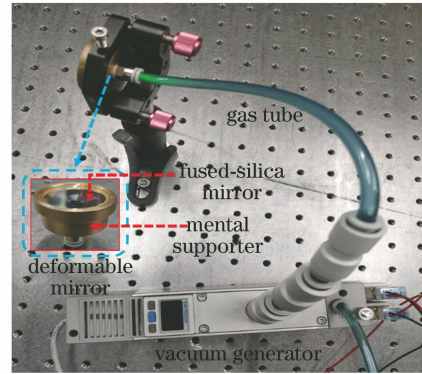


图 3 变形镜及真空发生器装置实物图

Fig. 3 Physical map of the deformable mirror and the vacuum generator device

图 4 给出了采用泰曼-格林干涉仪测量的变形镜面型的球面项和非球面项的空间分布。从图中可以看出,在真空发生器未工作( $q_0 = 0$ )时,由于粘接工艺的原因,熔融石英镜片的初始面型为凸面,且非球面部分峰谷(PV)值为 50 nm ( $< \lambda/10$ )。当真空发生器正常工作( $q_0 = 0.08$  MPa)时,由于气室负压的原因,熔融石英镜片的面型为凹面,且非球面部分 PV 值为 100 nm ( $< \lambda/10$ )。

图 5 给出了变形镜的光焦度和非球面部分的 PV 值随镜面气压差的变化情况。气压差的调节范围为 0 ~ 0.08 MPa 之间。可以看出,随着气压差的增加,变形镜的光焦度近似线性增大,由于其较好的线性关系,因此更容易使用变形镜实现光焦度的调节,以动态补偿激光器谐振腔的稳定性。另一方面,非球面的 PV 值随着气压差的增大而增大,但在可调节范围内 PV 值均小于 100 nm,可见非球面部分对谐振腔的影响很小,可忽略不计。

## 3 实验与讨论

用所制备的变形镜对碟片激光器在整个泵浦范围内光焦度的变化进行补偿,其实验装置原理及实物示意图如图 6 所示。碟片激光晶体为掺杂浓度 11%(质量分数),厚度为 0.2 mm 的 Yb:YAG 晶



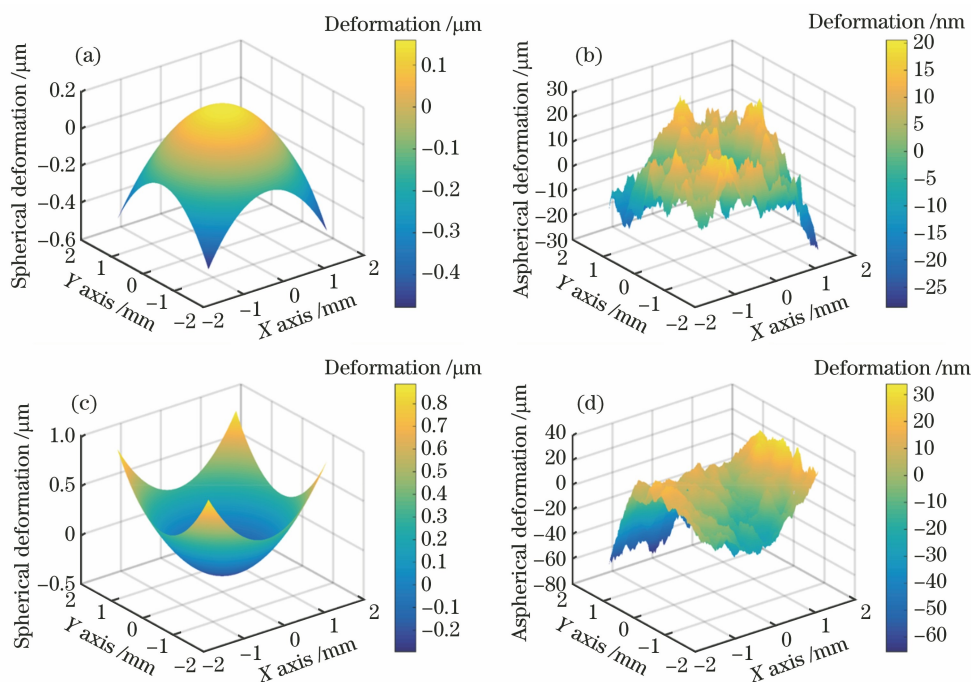


图 4 变形镜面型的球面项和非球面项的空间分布。(a)气压为 0 时的球面面型;(b)气压为 0 时的非球面面型;(c)气压为 0.08 MPa 时的球面面型;(d)气压为 0.08 MPa 时的非球面面型

Fig. 4 Spatial distribution of spherical and aspherical parts of the surface shape of the deformable mirror. (a) Spherical surface shape at the air pressure 0; (b) aspherical surface shape at the air pressure 0; (c) spherical surface shape at the air pressure 0.08 MPa; (d) aspherical surface shape at the air pressure 0.08 MPa

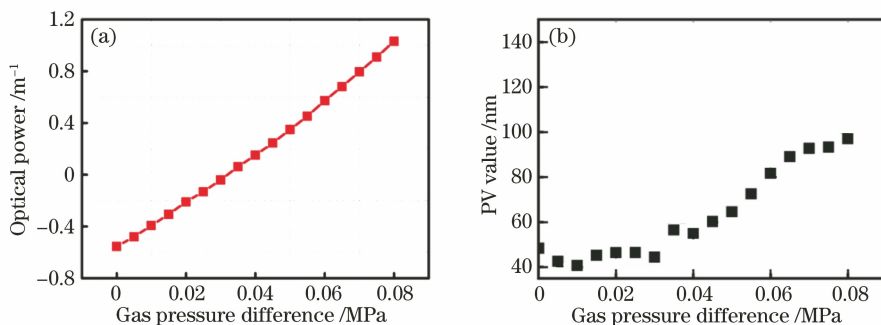


图 5 气压差从 0~0.08 MPa 时变形镜参数变化。(a)球面项光焦度;(b)非球面项 PV 值

Fig. 5 Deformable mirror parameter change with the gas pressure difference ranges from 0 to 0.08 MPa.

(a) Optical power of spherical surface; (b) PV value of aspherical surface

体,通过特殊的焊接工艺焊接在铜制热沉上,并用 20 °C 的水冷却。光纤耦合的 940 nm 半导体激光器作为泵浦源,最大泵浦功率为 50 W。泵浦光斑的直径设计为 1.5 mm,双抛物面镜多程泵浦结构<sup>[16-17]</sup>,可实现 40 次多程泵浦,泵浦系统对泵浦光的利用率可达 98%。考虑到多程泵浦系统和碟片晶体前后表面膜层的损耗,激光晶体吸收的泵浦功率约为 40 W。另一方面,采用稳定腔法测量碟片晶体的光焦度的变化范围为 $[0.11 \text{ m}^{-1}, 0.19 \text{ m}^{-1}]$ 。实验中采用 Z 形谐振腔,变形镜 DM<sub>1</sub> 用作端镜,其曲率半径可以通过改变压强在 $[2.050 \text{ m}, +\infty)$ 之间调整,

与碟片晶体之间的距离  $L_1$  为 0.4 m。RM 是半径为 3 m 的高反凹面镜,与碟片晶体之间距离  $L_2$  为 0.8 m,与平面输出镜 M<sub>2</sub> 之间的距离  $L_3$  为 0.5 m,输出镜的透过率为 5%。功率计(Ophir,NOVAII)和激光模式分析仪(Ophir,SP907)用于同时测量输出功率和光束质量,实验装置图如图 6 所示。

基于碟片晶体光焦度的变化和谐振腔的结构参数,可以计算出不同曲率半径的变形镜对应的碟片晶体处激光光斑尺寸随光焦度的变化曲线,如图 7 所示。从图中可以看出,随着变形镜的曲率半径  $R$  从  $+\infty$  变化至 2.050 m,碟片晶体上激光光斑尺寸

与碟片光焦距的变化曲线在保持形状不变的情况下不断左移,变化量为  $0.6 \text{ m}^{-1}$ 。变形镜的这一特性

可以用于补偿大范围内碟片晶体光焦距的变化,保持激光输出模式的稳定性。

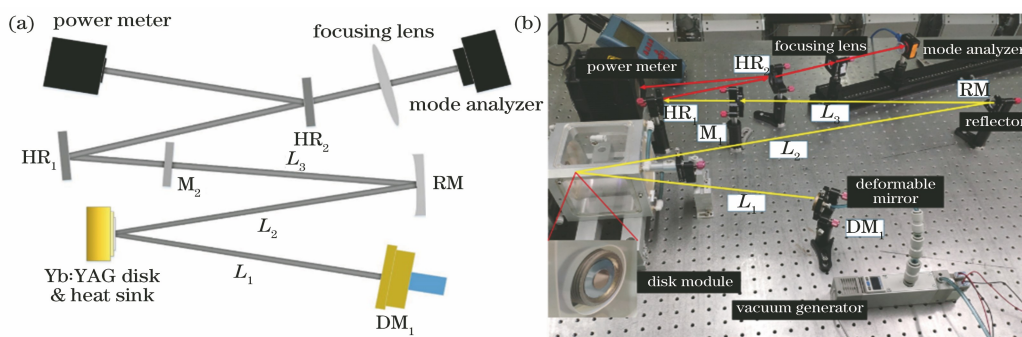


图 6 实验谐振腔及光路示意图。(a)原理图;(b)实物图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental resonant cavity and optical path. (a) Schematic diagram; (b) physical diagram

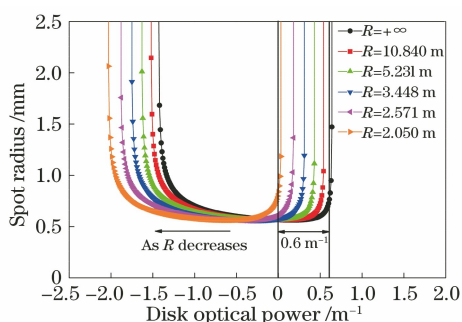


图 7 碟片稳区随变形镜曲率半径变化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the stable region of the disk changing with the radius of curvature of the deformable mirror

为了与变形镜的动态补偿进行比较,在实验装置中使用具有固定曲率半径的反射镜来实现出光。图 8(a)显示了当端镜为平面镜时,碟片晶体上的激光光斑尺寸与其光焦距之间的关系。碟片晶体上的激光光斑半径设计为  $0.56 \text{ mm}$ ,基模半径与泵浦光斑半径之比为  $0.75$ 。可以看出,随着泵浦电流的增加,碟片晶体的光焦距不断增加。如果没有动态补

偿,谐振腔的工作点会不断向右移动,但在整个泵浦范围内,基模半径与泵浦光斑半径之比变化很小,激光开始时在阈值处为  $\text{TEM}_{00}$  模,随着泵浦功率的增加,高阶模逐渐起振,光束质量逐步降低。不同泵浦电流下的光束剖面如图 8(a)所示。图 8(b)给出了谐振腔光束质量和输出功率与泵浦电流的关系。可以看出,对于较小的泵浦电流  $3 \text{ A}$ (泵浦功率约为  $18.3 \text{ W}$ ),激光光束质量接近基模( $M^2 = 1.02$ )。随着泵浦电流的增加,输出功率线性增加,而光束质量逐渐降低。当泵浦功率达到  $50 \text{ W}$ (泵浦电流  $9 \text{ A}$ )时,输出功率可以达到  $15 \text{ W}$ ,但光束质量会下降到  $M^2 = 1.97$ 。

为了抑制谐振腔中的高阶模振荡,进一步提高基模半径与泵浦光斑半径的比值,同时稳区的宽度也随之减小<sup>[18]</sup>。基模半径与泵浦光斑半径之比设计为  $0.96$ ,碟片晶体上的激光光斑半径为  $0.72 \text{ mm}$ ,使用曲率半径  $R = 2.506 \text{ m}$  的端镜重复实验。图 9 给出了当端镜为平面镜时碟片晶体上的

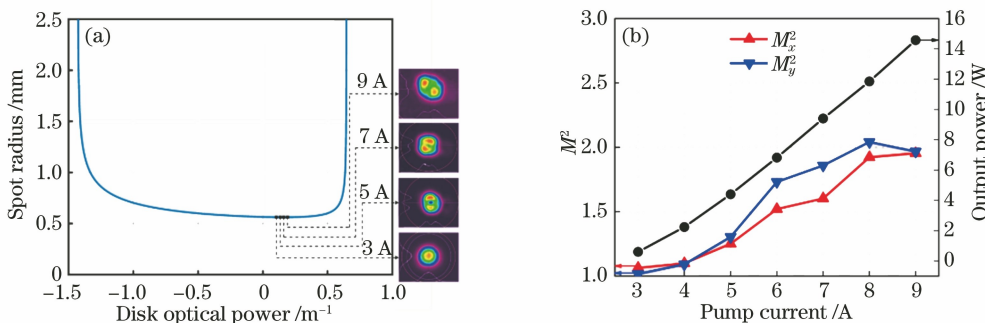


图 8 当端镜为平面镜时碟片晶体上参数变化。(a)端镜为平面镜时碟片晶体上的激光光斑半径与碟片光焦距的关系及不同泵浦电流下的光束剖面;(b)输出功率及  $M^2$  因子与泵浦电流的关系

Fig. 8 Thin disk crystal parameter change when the rear mirror is a plane mirror. (a) Relationship between the laser spot size and disk optical power, and the beam spot profiles with different pump currents; (b) relationship between the output power and  $M^2$  factor with the pump current

激光光斑半径与碟片光焦距的关系及光束剖面与不同泵浦电流的关系。从图中可以看出,激光开始时在阈值处为  $TEM_{00}$  模,随着泵浦电流的增加,光焦距的增加会使基模半径急剧增加,衍射损耗也随之增加。谐振腔的稳定性和输出功率开始急剧下降,光束质量也随之下降,实验中可以看到光束剖面的严重畸变。

基于上述实验,很难同时在整个泵浦范围内实现更大的基模尺寸、高稳定性谐振腔和更好的光束质量,而变形镜是应对此挑战的一个很好的解决方案。图 10 给出了使用所设计的球面变形镜后碟片上光斑半径、光束质量和输出功率随着泵浦电流的动态变化关系。基模半径与泵浦光斑半径之比取 0.96,则碟片晶体上的光斑半径为 0.72 mm。可以看出,随着泵浦电流的增加,碟片晶体的光焦距随之增加,为了保持碟片晶体上的光斑半径不变,通过调整变形镜的气压对其曲率半径进行动态调整,从而实现激光器工作点同步移动。图 10(a) 标出了泵浦电流分别为 3、5、7 和 9 A 时,通过调整变形镜曲率实现平移后的四个工作点以及输出光斑的模式测量结果。可以看出,在低功率运行时,激光输出的模式为  $TEM_{00}$  模式,随着泵浦电流的增加,变形镜的曲率半径从 3 A 时的 2.506 m 同步变化到 9 A 时的

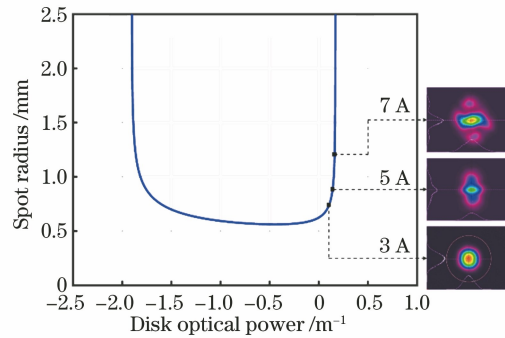


图 9 端镜为平面镜时碟片晶体上的激光光斑大小与碟片光焦距的关系及不同泵浦电流下的光束剖面  
Fig. 9 Relationship between the laser spot size on the thin disk crystal and disk optical power when the rear mirror is a plane mirror and the beam spot profiles with different pump currents

2.911 m。碟片晶体上的激光光斑半径始终保持为 0.72 mm,在四个工作点测得的激光光束剖面仍为  $TEM_{00}$  模,在整个泵浦范围内高阶模得到了很好的抑制。另一方面,图 10(b) 给出了光束质量与输出功率随着泵浦电流的变化关系,可以看出,随着泵浦电流的增加,输出功率呈线性增加。与之前的结果相比,使用变形镜的最大输出功率仍然达到了 14 W,同时光束质量在整个泵浦范围内很好地保持在基模,光束质量因子分别为  $M_x^2 = 1.20, M_y^2 = 1.15$ 。

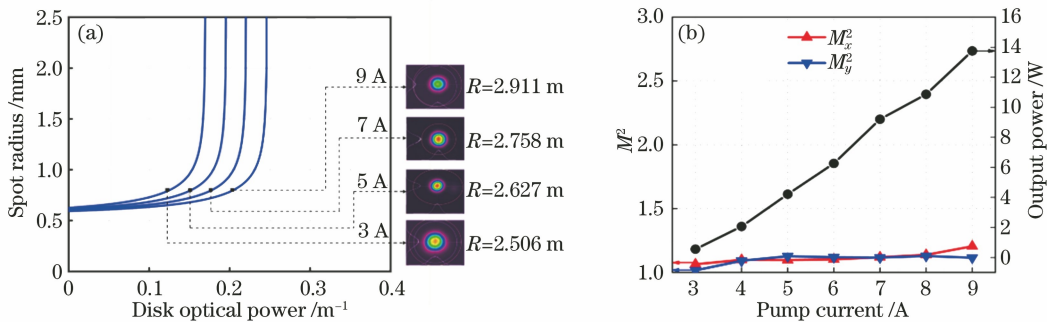


图 10 使用变形镜动态补偿碟片光焦距时碟片晶体参数变化。(a) 激光光斑半径与碟片光焦距的关系及不同泵浦电流下的光束剖面;(b) 输出功率及  $M^2$  因子与泵浦电流的关系

Fig. 10 Thin disk crystal parameter change by using the deformable mirror to dynamically compensate. (a) Relationship between the laser spot size and disk optical power, and the beam spot profiles with different pump currents; (b) relationship between the output power and  $M^2$  factor with the pump current

### 4 结 论

综上所述,本研究基于薄板微扰弯曲理论,设计并制作了一种通过调控气压来实现均匀厚度熔融石英镜片面型连续变化的球面变形镜。该球面变形镜的曲率半径变化范围可达  $[2.050 \text{ m}, +\infty)$ ,与现有变形镜的技术方案相比,制作工艺简单、成本低廉。

在此基础上,开展了基于此球面变形镜补偿碟片激光器光焦距动态变化的实验研究。实验结果表明,在大模体模式匹配的谐振腔设计中,采用此球面变形镜的动态补偿技术,可以对碟片晶体光焦距的变化进行有效的动态补偿,实现全泵浦范围内稳定的模式匹配,从而保证了高光束质量的稳定激光输出。另一方面,针对采用平凹腔结构的谐振腔布

局,该球面变形镜曲率的变化范围能够支撑碟片晶体光焦度的变化量达到  $0.6 \text{ m}^{-1}$ ,如果忽略在高功率注入条件下,碟片激光晶体非球面畸变对光束质量的影响,以及应力断裂极限的限制,根据碟片晶体光焦度与泵浦功率密度变化的线性关系,理论上该球面变形镜可以实现  $0\sim 13 \text{ kW/cm}^2$  泵浦功率密度范围内碟片晶体光焦度变化的动态补偿。

### 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] Schad S S, Gottwald T, Kuhn V, et al. Recent development of disk lasers at TRUMPF [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9726: 972615.
- [3] Peng Y H, Lim Y X, Cheng J, et al. Near fundamental mode 1.1 kW Yb:YAG thin-disk laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(10): 1709-1711.
- [4] Schad S S, Kuhn V, Gottwald T, et al. Near fundamental mode high-power thin-disk laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8959: 89590U.
- [5] Ryba T, Zaske S, Schad S S, et al. Latest advances in high power and high brightness laser technology [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10896: 108960W.
- [6] Zhu G Z, Zhu X, Wang M, et al. Analytical model of thermal effect and optical path difference in end-pumped Yb:YAG thin disk laser [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(29): 6756-6764.
- [7] Piehler S, Weichelt B, Voss A, et al. Power scaling of fundamental-mode thin-disk lasers using intracavity deformable mirrors [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(24): 5033-5035.
- [8] Lubeigt W, Valentine G, Burns D. Enhancement of laser performance using an intracavity deformable membrane mirror [J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 10943-10955.
- [9] Cherezova T Y, Chesnokov S S, Kaptsov L N, et al. Active laser resonator performance: formation of a specified intensity output [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(33): 6026-6033.
- [10] Chetkin S A, Vdovin G V. Deformable mirror correction of a thermal lens induced in the active rod of a solid state laser [J]. *Optics Communications*, 1993, 100(1/2/3/4): 159-165.
- [11] Forbes F, Roddier F, Poczulp G, et al. Segmented bimorph deformable mirror [J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1989, 22(6): 402-405.
- [12] Zhang N, Guo S M, Lu J Q, et al. Characteristics of Airy beams generated with deformable mirrors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 152601.
- 张楠, 郭宋明, 卢佳琦, 等. 基于变形镜生成 Airy 光束特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(15): 152601.
- [13] Han H M, Fan Y P, Yang Y C, et al. Generation and propagation characteristics of multi-wavelength Airy beams based on deformable mirrors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(16): 1626001.
- 韩洪民, 范引鹏, 杨叶城, 等. 基于变形镜的多波长艾里光束生成与传播特性 [J]. *光学学报*, 2021, 41(16): 1626001.
- [14] Apollonov V V, Vdovin G V, Ostrovskaya L M, et al. Active correction of a thermal lens in a solid-state laser. I. Metal mirror with a controlled curvature of the central region of the reflecting surface [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1991, 21(1): 116-118.
- [15] Piehler S, Dietrich T, Wittmüss P, et al. Deformable mirrors for intra-cavity use in high-power thin-disk lasers [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 4254-4267.
- [16] 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.
- [17] 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.
- 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.
- [18] Magni V. Multielement stable resonators containing a variable lens [J]. *Journal of the Optical Society America A*, 1987, 4: 1962.