

高功率CO₂激光器的热透镜效应仿真和补偿技术

吴浩冉^{1,2*}, 步 扬^{2#}, 李建郎¹

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

²中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海

收稿日期: 2025年4月26日; 录用日期: 2025年5月19日; 发布日期: 2025年5月27日

摘 要

高功率CO₂激光器广泛应用于加工处理等各个领域。随着功率增大, 热效应是影响高功率CO₂激光光束质量的主要原因。文章主要针对CO₂激光器中高功率导致的热透镜效应, 将有限元方法与光线追踪相结合, 建立了元件/模块附近空气的温升和对流模型, 分析了光学元件与附近气体之间的传热过程。利用该模型, 探究了光学元件的热变形及其对光学系统的影响。结果表明, ZnS、ZnSe和金刚石透镜在5 kW功率下的形变量分别为13.7 μm 、1.02 μm 、0.00291 nm。随着功率增大到50 kW, ZnS透镜形变更明显, 分别是204 μm 、15 μm 、0.0288 nm。在此基础上, 研究基于波前优化技术, 设计了一种补偿透镜来补偿热效应导致的波前畸变。结果表明, 球面镜和非球面镜均能对波前畸变进行有效补偿。在高功率下, 将三种透镜的RMS值分别从1.4773 λ 、5.2824 λ 、4.9372 $\times 10^{-6} \lambda$ 优化到0。偶次非球面镜补偿后的波前面型更平坦, 能够更有效地校正高阶像差。

关键词

高功率激光器, 热效应, 有限元, 光学设计, 热补偿

Simulation and Compensation Technology of Thermal Lens Effect in High-Power CO₂ Laser

Haoran Wu^{1,2*}, Yang Bu^{2#}, Jianlang Li¹

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 吴浩冉, 步扬, 李建郎. 高功率 CO₂ 激光器的热透镜效应仿真和补偿技术[J]. 建模与仿真, 2025, 14(5): 798-817.
DOI: 10.12677/mos.2025.145435

Abstract

High-power CO₂ lasers are widely used in various fields, such as processing. As the power increases, thermal effects are the main reason affecting the quality of high-power CO₂ laser beams. This article mainly focuses on the thermal lens effect caused by high power in CO₂ lasers. By combining the finite element method with ray tracing, a temperature rise and convection model of the air near the component/module is established, and the heat transfer process between the optical component and the nearby gas is analyzed. Using this model, the thermal deformation of optical components and its impact on optical systems were analyzed. The results showed that the deformation of ZnS, ZnSe, and diamond lenses at a power of 5 kW were 13.7 μm , 1.02 μm , and 0.00291 nm, respectively. As the power increased to 50 kW, the deformation of ZnS lenses changed significantly, reaching 204 μm , 15 μm , and 0.0288 nm, respectively. On this basis, a compensating lens is designed based on wavefront optimization technology to compensate for wavefront distortion caused by thermal effects. The results indicate that both spherical and non-spherical mirrors can effectively compensate for wavefront distortion. At high power, optimize the RMS values of the three lenses from 1.4773 λ , 5.2824 λ , and $4.9372 \times 10^{-6} \lambda$ to 0, respectively. The wavefront shape after even non-spherical mirror compensation is flatter, which can more effectively correct high-order aberrations.

Keywords

High Power Laser, Thermal Effect, Finite Element, Optical Design, Thermal Compensation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高功率 CO₂ 激光器是工业应用中功率最大、种类最多、应用广泛的一类常用气体激光器。高功率 CO₂ 激光器具有光束质量好、转换效率高、输出功率大、运行成本低、既能连续输出又能脉冲输出等众多特点,在激光焊接、切割、表面改性等领域有着广泛的应用[1]-[3]。工程系统中经常出现的关键问题之一是高功率状态下的稳定性。当功率越高,光学元件受热膨胀越迅速,导致在光学元件内部产生大折射率梯度,进而形成明显的热透镜效应;产生热透镜效应时,光学元件受热膨胀,会引起光程差异,导致波前畸变,影响光束质量和光学系统会聚、成像等性能,进而严重影响激光加工效果和加工效率。对高功率 CO₂ 激光器进行精确的热分析与热补偿是其稳定应用的关键[4] [5]。

近些年国内外对高功率 CO₂ 激光器的热分析与热补偿技术开展了系列研究。其中陆培华等研究了高功率 CO₂ 激光器谐振腔全反射镜由于热应力引起的表面变形导致的曲率半径变化。结果表明同样功率的温度场作用下铜镜的热变形大于硅镜,且随着温度升高,热致曲率半径减小,影响激光器的腔模振荡和激光器输出激光的功率与光束质量[6]。李隆等对比研究了 ZnSe 和 GaAs 窗片热形变,在 CO₂ 激光器谐振腔内激光功率最大为 1000 W 时, ZnSe 材料因为具有较小的吸收系数、较大的导热系数,所以其温度场相对温升较小[7]。铜镜因其高热导率和优异的散热能力,被广泛用于高功率光纤激光器的反射镜和散热组件,但铜在高应变率下易产生绝热剪切带(ASBs),导致局部应力集中和裂纹扩展,影响动态力学稳定性,且高功率激光对铜镜表面粗糙度和镀膜质量要求极高,国产镀膜技术仍面临损伤阈值低和膜层易

脱落的问题。硅材料在中红外波段具有高透过率,常用于激光窗口和透镜,但硅在高温或非均匀加热下易因热应力导致微裂纹,限制其在高功率连续激光中的应用。GaAs 在近红外和可见光波段具有高折射率和低吸收率,常用于激光二极管和光电探测器。其高载流子迁移率使其在超快激光调制和光通信中表现优异,但 GaAs 热导率较低,高功率下易发生热致晶格损伤,需结合微通道冷却技术。ZnSe 在红外波段(如 CO₂ 激光)具有高透过率和低散射损耗,是红外激光窗口和透镜的首选材料。其抗热冲击性能优于其他红外材料(如 Ge),适用于高功率脉冲激光系统。金刚石热导率(2200 W/mK)远超铜等材料,可承受兆瓦级激光功率负载,有效缓解热效应问题,是超高功率激光器的理想增益介质,但金刚石的高硬度和脆性使传统机械切割效率低、损耗高,且加工难度大、成本高。因此当前高功率激光材料应用的核心矛盾在于热稳定性与成本效益的平衡。

此外 Daqing 等研究了冷却气体对 CO₂ 激光器热透镜效应的影响,发现冷却气体可以降低透镜的温度,使其更快地稳定下来,且流量越大,工件表面功率密度达到稳定的速度越快,但当超过一定比例时,增大流量的影响不明显[8]。Takahashi 等通过探针 He-Ne 激光束的干涉测量了高功率 CO₂ 激光器透射光学器件的光学畸变,当 ZnSe 光学器件被连续高功率 CO₂ 激光照射时,通过摄像机观察到干涉条纹的变化。根据条纹图案的变化,获得了光学畸变,并推导出了温升的空间分布[9]。任温馨等采用基于 MEMS 技术加工的微变形反射镜作为激光器谐振腔的一部分,能实时补偿热透镜效应和提高激光器的输出功率,推导了热畸变与微变形镜面形变量、反射镜驱动单元上电压的关系并进行了实验。实验结果表明,在初始功率为 287 mW、383 mW、482 mW 和 800 mW 的情况下,使用微变形镜进行补偿可以将功率提高到 437 mW、710 mW、894 mW 和 993 mW,证明了使用微变形镜改善激光器腔内热畸变的可行性[10]。Rujian 等提出了一种基于平板主振荡器和功率放大器固态激光系统中组合变形镜(DM)的相位像差校正新方法,并进行了实验验证。由具有 11 个致动器的一维 DM 和具有 67 个有效致动器的二维 DM 组成的可变形镜的自适应光学系统被设计用于校正相位像差,该系统不需要高压驱动器,对高阶相位像差具有很好的校正效率。实验结果表明,板条激光束的波前得到了很好的补偿,残余波前的均方根(RMS)小于 0.08 m。板条激光在远场的光束质量提高到 1.67 [11]。变形镜通过微机电系统(MEMS)或压电驱动单元动态调整镜面形状,实现高精度波前校正。然而,其结构复杂、成本高昂,且依赖复杂的控制算法和实时反馈的系统,限制了在紧凑型设备中的应用。自适应光学系统通常结合波前传感器与变形镜,通过闭环控制实时校正动态畸变。但传统自适应光学系统体积庞大,需要复杂的硬件支持(如哈特曼-夏克传感器),难以适应高分辨率空间光学遥感器等小型化需求。无波前传感器自适应光学系统虽简化了结构,但校正能力受限。

研究高功率 CO₂ 激光器热效应主要方法有半解析热分析法[11]-[13]、实验测量法[14]、数值模拟法[15]、有限元分析法[16] [17]等。半解析热分析方法是基于热传导方程和边界条件,为热效应提供了理论上的分析和解释。其缺点在于为了计算方便,往往需要简化实际问题,导致模型与实际情况有较大差距,且对于复杂结构或非线性热效应问题,半解析方法可能无法提供准确解。实验测量法需要较长时间,不利于快速获取结果,且实验设备、材料以及人力成本高。同时实验结果受实验条件(如环境温度、湿度等)和测量仪器精度的影响。相比实验测量,数值模拟通常能够更快地获得结果。但数值模拟的准确性严重依赖于所建立的数学模型和输入参数。对于复杂模型和高精度模拟,需要大量的计算资源。并且数值模拟结果通常需要通过实验数据进行验证,以确保其可靠性。有限元分析法能够模拟复杂结构中的温度分布和应力分布[18],可以提供准确结果,适应各种复杂的边界条件和材料属性。

尽管已有研究通过实验或数值模拟对热效应进行了初步探索,但这些研究多集中于低功率条件,且通常仅针对少数材料(如 ZnSe 或 GaAs)进行分析,缺乏对高功率条件下多种材料热效应的系统性研究。此外,现有的热补偿技术多依赖于简单的球面透镜设计,难以有效应对复杂的热畸变问题。针对这些局

限性, 本文针对高功率 CO₂ 激光器中存在的热效应, 采用有限元分析法, 将有限元方法与光线追踪相结合, 建立光学系统对流、传热和热膨胀模型。利用该模型, 分析 5 kW~50 kW 功率条件下, ZnSe、ZnS、金刚石等不同材料热效应导致的热影响。在此基础上, 采用基于波前优化的热补偿技术分别设计一种球面/非球面补偿透镜来补偿热效应导致的复杂波前畸变, 其核心创新在于结构简化与成本可控。相较于变形镜和自适应光学系统, 该方法无需动态执行器或复杂控制算法, 适用于热效应缓慢变化的高功率激光系统。例如, 通过优化透镜材料的热膨胀系数与折射率温度系数, 可在特定功率范围内实现稳定的波前校正, 尤其适合工业激光加工等场景。

2. 研究方法

2.1. 热效应

当激光器输出高功率时, 光学元件受激光束连续长时间照射后, 光学元件本身温度逐渐升高, 进而导致元件发生膨胀和变形, 由此导致聚焦后焦点位置变化[19], 如图 1 所示。

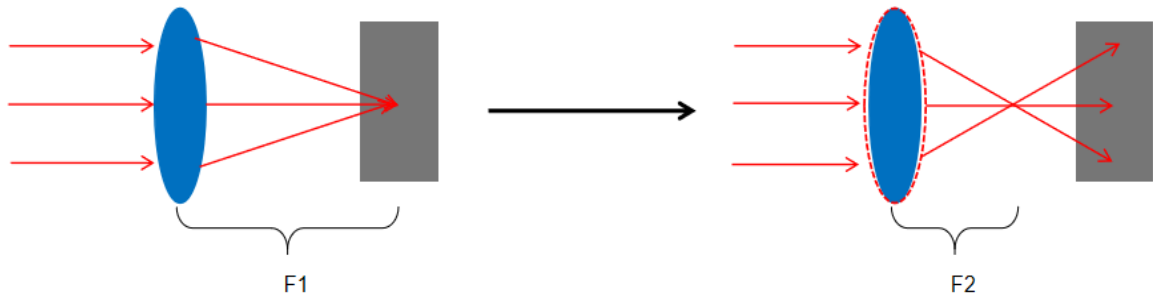


Figure 1. Schematic diagram of thermal lens effect

图 1. 热透镜效应示意图

高功率下的热变形量计算主要步骤: 首先根据透镜受到的高功率激光分布, 设置热源项 Q 。然后求解热传导方程, 得到透镜温度分布 $T(x, y, z)$ 。再将热膨胀效应作为结构场输入, 计算因热膨胀导致的透镜形变[20] [21]。

透镜在高功率作用下的热传导方程为:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + Q = 0 \quad (1)$$

其中 k 是材料热导率; T 是温度; Q 是激光辐射功率密度。

温度变化导致热膨胀, 应变 ε 表示为:

$$\varepsilon = \alpha \cdot (T - T_0) \quad (2)$$

热传导方程描述温度分布, 热膨胀方程计算由温度变化引起的应变, 结构力学方程则用于求解形变(通过应变力矩阵影响结构变形)。结构方程为:

$$\alpha = C(\varepsilon - \varepsilon_0) \quad (3)$$

其中 α 是应力; C 是材料的刚度矩阵; ε 是总应变(包括热膨胀引起的应变); ε_0 是初始应变(在参考温度下, 通常为零)。通过耦合温度场和结构场, 可以计算由于热膨胀引起的透镜变形量。

2.2. 仿真模型

基于热效应, 建立了如图 2 所示的模型[22]。在该模型中, 激光光束的功率密度作为体热源输入到透

镜模型中,以模拟激光加热效应。激光从透镜左侧中心入射,光束半径为 4.8 mm,这一尺寸与常见激光器的输出光束相匹配,确保模型能够准确反映实际激光加热过程。透镜直径为 50.8 mm,厚度为 8 mm,这一尺寸是基于实际高功率激光系统中常用透镜的典型参数,能够有效聚焦激光光束并具备足够的机械强度以抵抗热变形。透镜右侧是长度为 20 mm 的空气场,用于模拟激光通过透镜后的热扩散和能量耗散过程,这一长度在保证仿真精度的同时避免了因空气场过长而导致的计算资源浪费。热边界条件包括透镜表面的对流换热和空气场的开放边界,力学边界条件为透镜边缘固定。通过有限元法求解,分析透镜在不同激光功率下的温度分布和形变量。

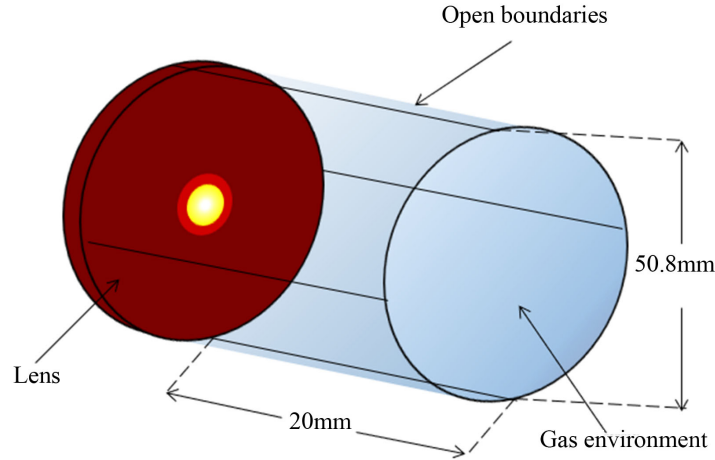


Figure 2. Simulation model diagram
图 2. 仿真模型示意图

2.3. Zernike 多项式方法

为定量描述波前畸变,本文采用 Zernike 多项式方法。Zernike 多项式是一种常用的数学工具,用于表示波前的高阶和低阶像差。通过将仿真得到的波前数据与 Zernike 基函数进行拟合,可以得到各个像差项的系数,特别是低阶项,如球差、像散等,它们对波前的畸变贡献较大。Zernike 多项式不仅可以识别热效应引起的光束畸变,还能作为补偿设计的基础,调整透镜形状,以降低甚至消除热畸变对激光束质量的影响[23]-[25]。

Zernike 多项式表示为径向函数和角度函数的乘积:

$$Z_n^m(r, \theta) = R_n^m(r) \cdot e^{im\theta} \quad (4)$$

其中 n 是总阶数(非负整数), m 是循环对称性指数(在 $-n \leq m \leq n$ 范围内,且 m 与 n 同号), r 是归一化的径向坐标(0 到 1), θ 是角度坐标(0 到 2π)。径向多项式的定义确保了 Zernike 多项式在单位圆内是正交的。它的具体形式为:

$$R_n^m(r) = \sum_{k=0}^{\frac{n-|m|}{2}} (-1)^k \frac{(n-k)!}{k! \left(\frac{n+|m|}{2} - k \right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - k \right)!} r^{n-2k-|m|} \quad (5)$$

对于旋转对称的表面(如偶次非球面),角向函数 $e^{im\theta}$ 可以被忽略,表达式简化为仅与径向坐标相关的形式:

$$Z_n^m(r) = R_n^m(r) \quad (6)$$

Zernike 多项式的径向部分 $R_n^m(r)$ 可以展开为 r 的幂级数。将 Zernike 径向多项式的偶次部分提取出来进行求和, 得到偶次非球面的修正项 $\sum a_i r^{2i}$, a_i 为偶次非球面的修正项系数。结合二次曲面项, 得到偶次非球面的标准形式:

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2r^2}} + \sum a_i r^{2i} \quad (7)$$

式中 $z(r)$ 为偶次非球面面型, c 为顶点处的基本曲率, r 为垂直光轴方向的径向坐标, k 为二次曲面常数, a_i 为非球面系数, i 为常数项。其中 $k < -1$ 为双曲面, $k = -1$ 为抛物面, $-1 < k < 0$ 为椭圆, $k = 0$ 为球面, $k > 0$ 为竖起的椭圆。

3. 分析与讨论

3.1. 热透镜效应

本文选择 COMSOL Multiphysics 进行仿真, 可以在更为极限的条件下预测材料的热效应和波前变形, 为高功率激光系统的设计和优化提供更加精确的仿真数据[26]。材料方面, 本研究选择了 ZnSe、ZnS 和金刚石三种透镜材料进行对比分析。ZnSe 和 ZnS 由于较低的热导率和较大的热膨胀系数, 在高功率激光照射下易产生较大温升和形变, 适合研究热效应对波前的影响。金刚石具有优异的热导率和极低的热膨胀系数, 几乎不发生温度变化和形变, 适合研究高功率激光下光学系统的稳定性和性能。通过对这三种材料的热效应仿真, 可以为透镜材料在高功率激光系统中的选择提供重要参考[27][28]。ZnSe、ZnS、金刚石材料的各项物理性能参数如表 1 所示。

Table 1. Parameters used in thermal simulation

表 1. 热模拟中的相关参数

Parameter	ZnS	ZnSe	Dia	Air
Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	10	20	2200	0.03
Thermal expansion coefficient/K	6.3 × 10 ⁻⁶	7.1 × 10 ⁻⁶	1.1 × 10 ⁻⁶	3.67 × 10 ⁻³
Specific heat capacity/(J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.33	0.26	0.5	1.01
Density/(g·cm ⁻³)	4.08	5.27	3.51	1.204 × 10 ⁻³
Young's modulus/GPa	50	70	1050	—
Poisson's ratio	0.38	0.27	0.07	—
Refractive index	2.2	2.4	2.4	1.0003
Initial temperature/K	288.15	288.15	288.15	288.15

将光束入射透镜的区域作为体热源输入, 初始功率设置 5 kW、10 kW、20 kW 和 50 kW, 模拟高功率激光对透镜的照射。在透镜的外表面与空气之间设置了对流边界条件, 模拟热量的散发与热交换, 对流换热系数设置为 10 W/(m²·K), 环境温度设定为 288.15 K。采用非结构化网格对几何模型进行离散化。透镜区域和光束入射区域的网格密度较高, 以确保计算精度。仿真采用瞬态分析, 总仿真时间为 100 s, 以确保系统达到稳态。时间步长设置为自适应, 初始时间步长为 0.1 s, 最大时间步长为 1 s, 收敛容差为 10⁻⁶。求解器选择直接求解器(Direct Solver), 以处理非线性问题并确保计算稳定性。运行仿真后, 通过有限元法求解热传导方程, 逐步计算每个时间步长的温度场。求解过程中, 监测温度场的收敛性, 确保结果的可靠性, 然后, 提取透镜和空气场的温度分布数据, 得到前场气体的全三维温度分布[29], 计算结果如图 3~5 所示。

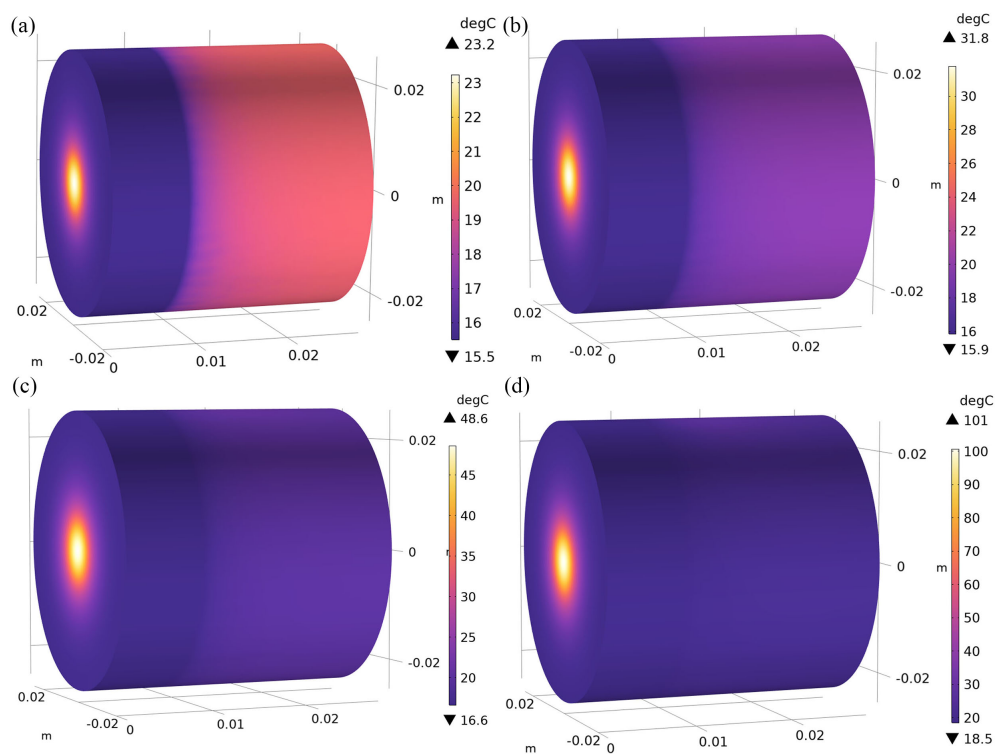


Figure 3. Simulation of temperature distribution of ZnSe material under different laser powers: (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

图 3. 不同激光功率下 ZnSe 材料温度分布的模拟: (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

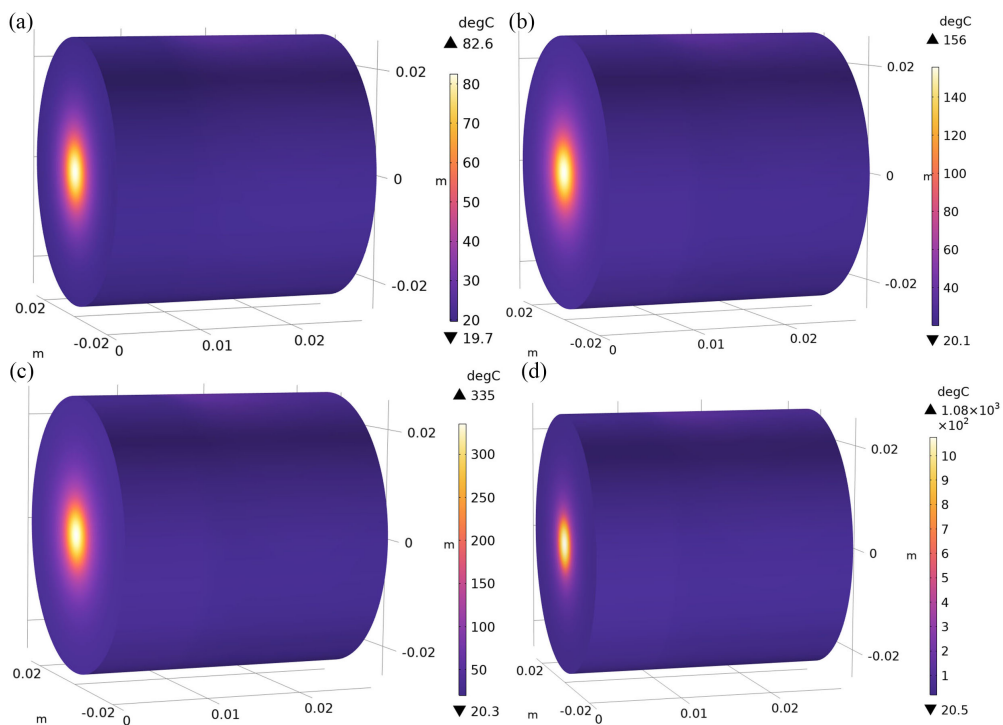


Figure 4. Simulation of temperature distribution of ZnS material under different laser powers: (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

图 4. 不同激光功率下 ZnS 材料温度分布的模拟: (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

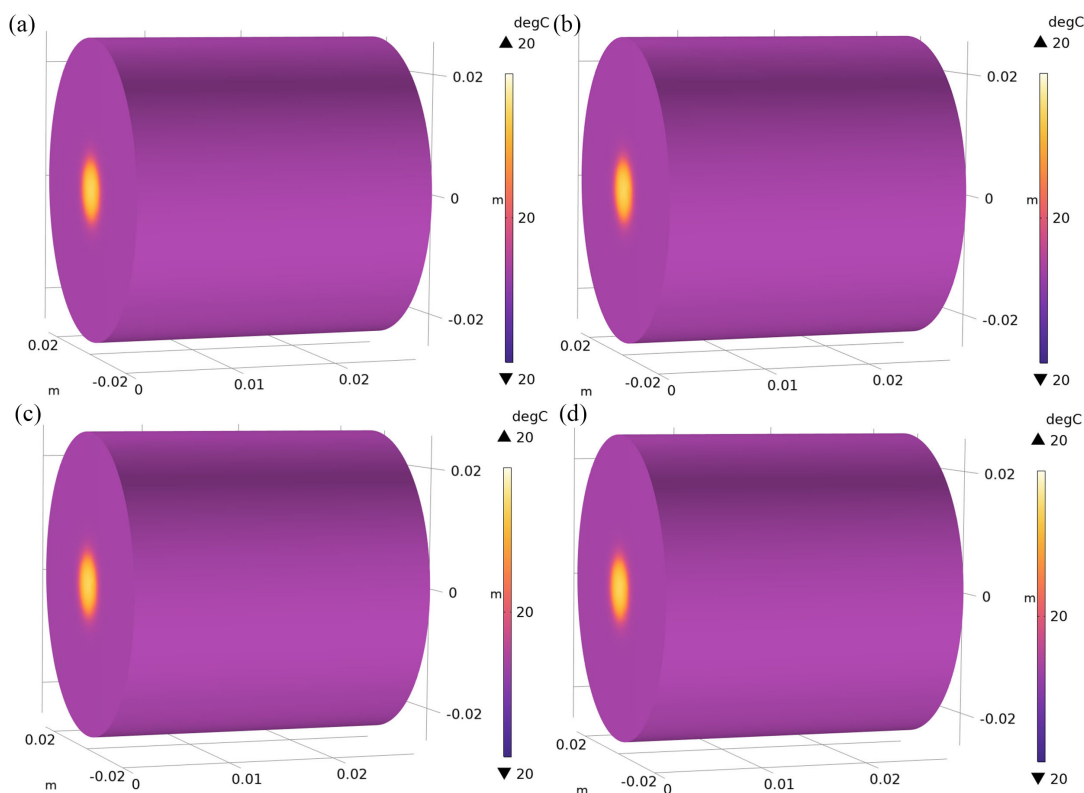


Figure 5. Simulation of temperature distribution of diamond material under different laser powers: (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

图 5. 不同激光功率下金刚石材料温度分布的模拟: (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

针对 ZnSe, 在 5 kW 激光功率下, 温升为 7.7℃。在 10 kW 激光功率下, 温升为 15.9℃, 在 20 kW 下温升为 32℃, 而在 50 kW 的高功率照射下, 温升则迅速增加到 82.5℃。这表明随着激光功率的增加, ZnSe 的温度升高逐渐加剧。ZnSe 的热导率相对较低, 使得其热量无法有效地快速扩散, 导致局部温度迅速上升, 并且出现较为显著的温度梯度。尤其在 50 kW 的功率下, ZnSe 透镜的温升明显, 这导致大变形和折射率变化, 严重影响激光的聚焦性能和透镜的光学稳定性。

由于 ZnS 的热导率更低, 且热膨胀系数大, 在相同激光功率下表现出更为显著的温升。在 5 kW 的激光功率照射下, ZnS 的温升为 62.9℃, 在 10 kW 的激光功率照射下, ZnS 的温升为 135.9℃, 在 20 kW 的功率下温升增至 314.7℃, 而在 50 kW 的高功率下, 温升超过了 1000℃, 接近 ZnS 的熔点(1700℃)。如此大的温升会导致 ZnS 透镜发生明显形变, 并引起严重的热应力和热破坏。

与 ZnSe 和 ZnS 的显著温升不同, 金刚石透镜几乎没有温升。由于金刚石具有极高的热导率(2200 W/mK), 它能够快速将吸收的激光能量传导到透镜的其他区域, 并且由于其极低的热膨胀系数, 即使在 5 kW、10 kW、20 kW 和 50 kW 的激光功率照射下, 金刚石透镜的温度保持在接近常温的状态。这使得金刚石在高功率激光照射下几乎不发生热变形, 从而保持光学元件性能的稳定性。

通过图 6 可以发现, 在 5 kW、10 kW、20 kW、50 kW 激光功率照射下, ZnSe 和 ZnS 的温度升高明显, 且 ZnS 材料温升更为剧烈。结合表 1 参数, 这些差异的主要原因在于材料的热导率和热膨胀系数, 以及它们对激光能量的吸收能力。在结构上, 由于金刚石为共价晶体, 碳原子通过强 sp^3 键形成三维网络, 声子(晶格振动量子)平均自由程长, 传热效率极高, 因此金刚石热导率极高(2200 W/mK), 且强共价键使晶格刚度极高, 温升引起的原子位移极小, 热膨胀系数($1.1 \times 10^{-6}/K$)接近各向同性且数值低。Zn-S 和

Zn-Se 为离子 - 共价混合键, 声子传播受晶格非谐振动与杂质散射抑制, 非谐振动会显著增加声子 - 声子散射概率, 缩短声子平均自由程(即声子在碰撞前传播的距离), 从而降低热导率。此外, 离子键与较弱共价键的结合导致晶格刚性较低, 原子热振动幅度大, 从而引发较高的热膨胀系数。高温下, 键合强度的衰减(软化效应)与非谐振动加剧进一步放大热膨胀, 并可能导致非线性变化。这一机理在 ZnS、ZnSe 等红外光学材料中表现尤为显著, 制约了其在高功率激光系统中的热稳定性。因此, 金刚石作为一种高热导率、低热膨胀系数的材料, 其在高功率激光照射下表现出了优异的热稳定性, 几乎不受热效应的影响, 适用于高功率激光系统中对光学稳定性有较高要求的应用。

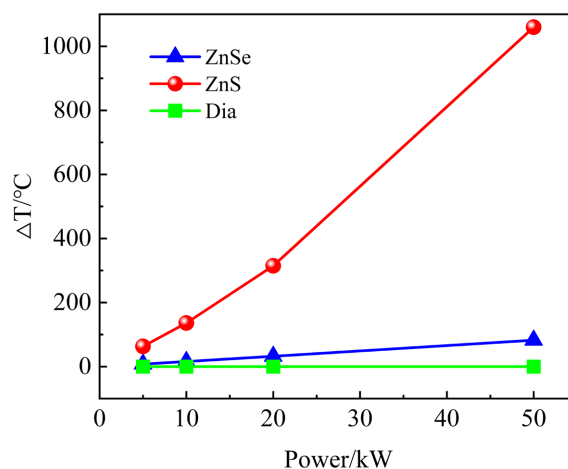


Figure 6. The variation of lens temperature with power

图 6. 透镜温度随功率的变化

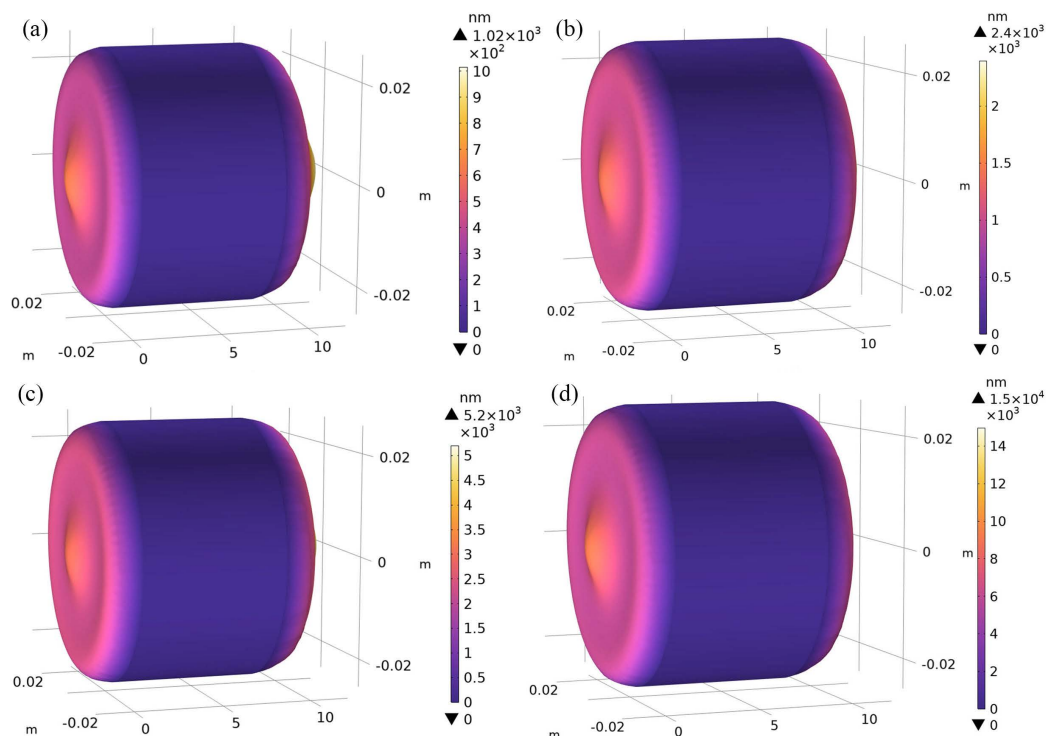


Figure 7. Simulation of deformation of ZnSe lens under different laser powers: (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

图 7. 不同激光功率下 ZnSe 透镜形变量的模拟: (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

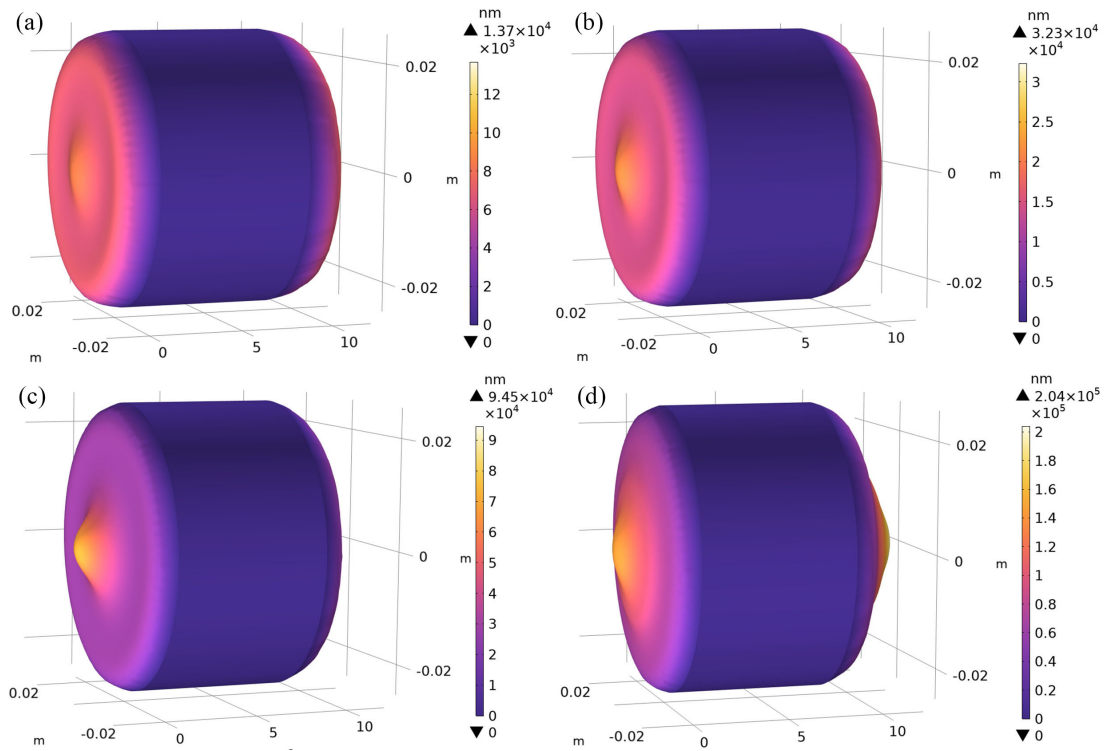


Figure 8. Simulation of deformation of ZnS lens under different laser powers: (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW
图 8. 不同激光功率下 ZnS 透镜形变量的模拟: (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

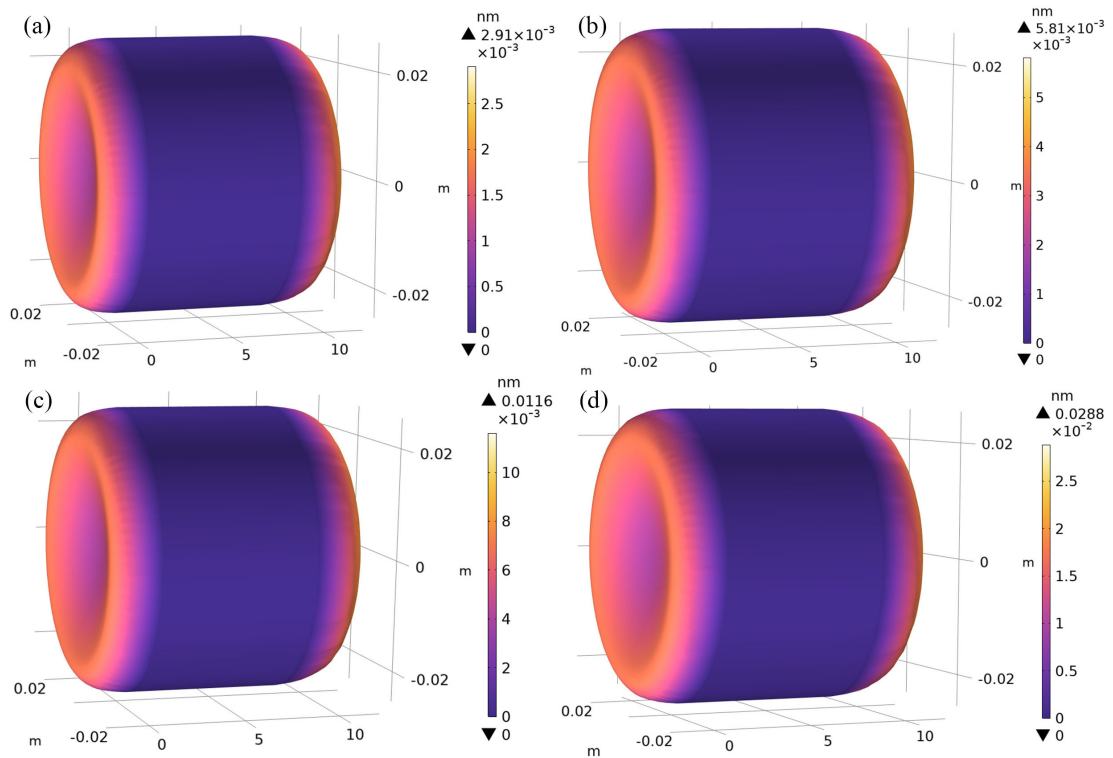


Figure 9. Simulation of deformation of diamond lens under different laser powers: (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW
图 9. 不同激光功率下金刚石透镜形变量的模拟: (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

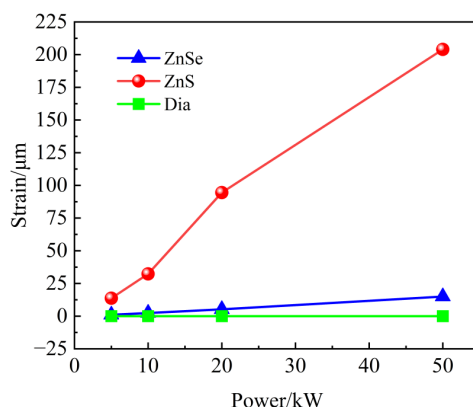


Figure 10. The variation of lens deformation with power

图 10. 透镜形变量随功率的变化

结合表 1 提供的仿真参数，初始温度设置为 288.15 K，对透镜边缘加以约束，通过热膨胀方程计算透镜位移量[30]，结果如图 7~9 所示。

如图 10 所示，ZnSe 和 ZnS 透镜在 50 kW 激光功率照射下的变形量分别达到 15 μm 和 204 μm。通常光学系统透镜材料的形变量应控制在几纳米到十几纳米以内，以避免影响光束的传播和聚焦精度。因此，ZnS 在高功率激光照射下的巨大变形量使得其在高功率激光应用中的可用性大大降低，无法满足高精度光学系统的需求。

对于 ZnSe，其变形量相较于 ZnS 小得多，但 15 μm 的变形量也会对光束质量产生较大影响，尤其是在高精度激光应用中，可能导致焦点直径的增大。变形可能使光束的焦点直径增大几十微米到几百微米，这种程度的变形可能会导致光束的能量分布变宽，影响单位面积能量，并影响激光系统的精度和稳定性。因此，虽然 ZnSe 的变形量相对较小，但在高功率激光照射下仍然需要采取冷却或材料优化等措施来减少热变形。

相比之下，金刚石的变形量几乎可以忽略不计，在任何功率下其变形量都维持在极低的范围内，这使得金刚石成为高功率激光系统中最具优势的材料，能够在高功率激光应用中维持光学性能，保证系统稳定性和精度。

3.2. 热透镜补偿与分析

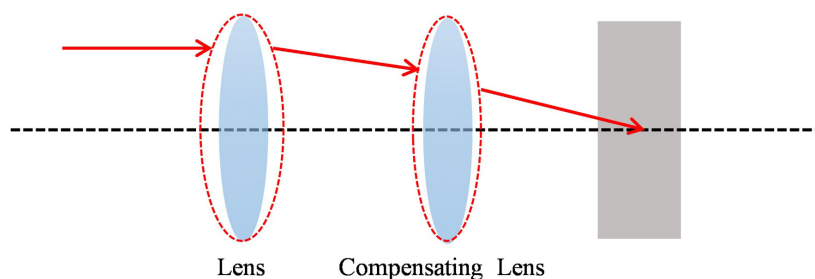


Figure 11. Light path diagram of compensated lens

图 11. 补偿透镜光路图

由于光学元件受到激光束的照射后会发生热膨胀，导致光学元件的形状和位置发生变化，光学元件的温度变化也会导致其折射率发生变化，从而影响光束的传播和聚焦效果。为了降低或消除热效应导致的波前畸变，本文基于波前优化技术，设计了一种补偿透镜来补偿热效应导致的波前畸变。其等效光路如图 11 所示。

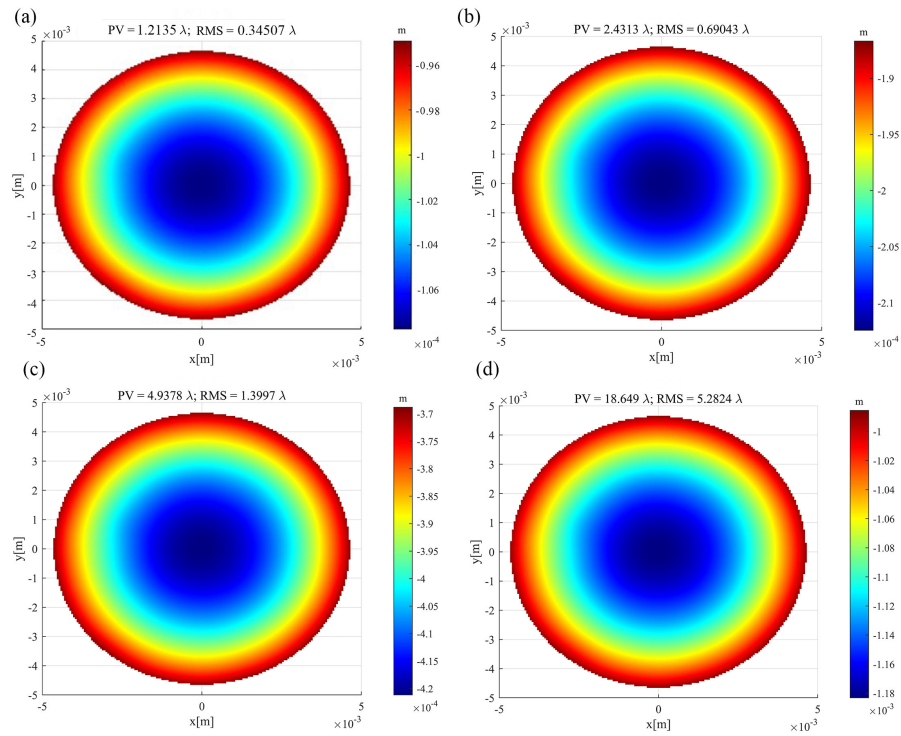


Figure 12. Distribution diagram of optical path difference under different laser powers (ZnSe): (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

图 12. 不同激光功率下光程差分布图(ZnSe): (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

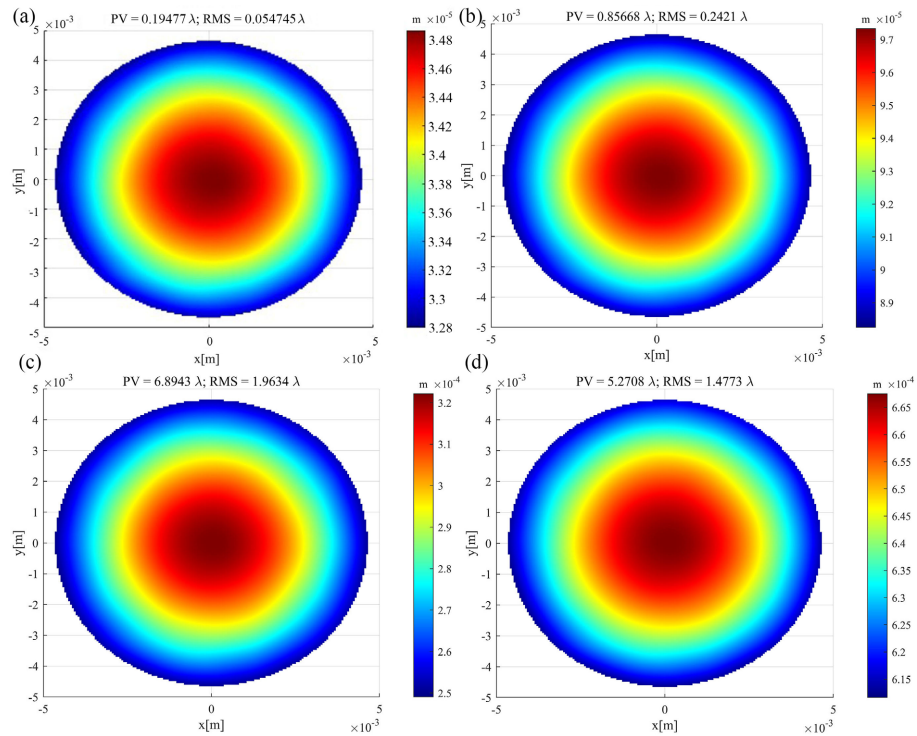


Figure 13. Distribution diagram of optical path difference under different laser powers (ZnS): (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

图 13. 不同激光功率下光程差分布图(ZnS): (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

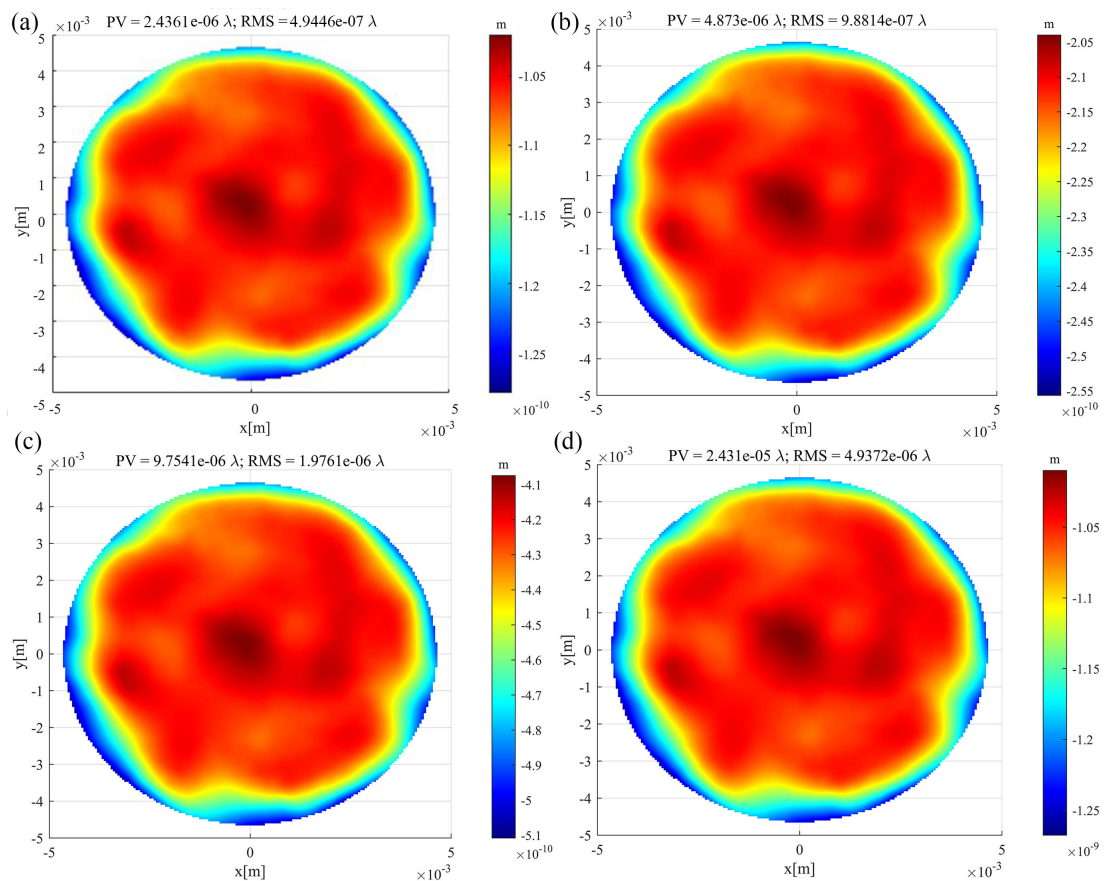


Figure 14. Distribution diagram of optical path difference under different laser powers (Dia): (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

图 14. 不同激光功率下光程差分布图(Dia): (a) 5 kW; (b) 10 kW; (c) 20 kW; (d) 50 kW

首先,使用 COMSOL 仿真计算透镜在高功率激光照射下的温度分布。基于温度分布,通过热膨胀计算得到透镜表面的形变,从而得到光程差(OPD)。将 COMSOL 输出的波前畸变数据导入 MATLAB,通过计算波前的最大值与最小值之差得到 PV 值,然后通过均方根运算得到 RMS 值,以评估波前质量和均匀性,计算结果如图 12~14 所示。计算出 PV 值和 RMS 值后,可以进一步分析不同材料在不同功率下的波前质量变化。PV 值和 RMS 值能够反映出光学系统的成像质量,PV 值较大意味着波前误差较大,焦点位置不稳定;而 RMS 值较高则意味着整体波前误差较大,光束质量较差[31] [32]。

随着激光功率增加,所有材料的波前畸变逐渐加大,表现在 PV 值和 RMS 值的增大。温度梯度对波前畸变的影响机理主要源于热膨胀形变与折射率变化的双重耦合作用,材料内部非均匀温度分布导致各区域热膨胀量差异,引发表面几何形变(如中心凸起或凹陷),同时折射率随温度变化进一步调制光程,两者叠加形成空间光程差(OPD),表现为离焦、球差等像差。轴对称温度场下(如激光光斑中心高温),径向热膨胀梯度主导低阶像差(如离焦),而陡峭温度梯度则激发高阶球差。此外,材料热性能差异(如 ZnS 热导率低导致温升集中、金刚石高热导率抑制温度变化)决定了畸变程度与模式复杂度,尤其在 50 kW 功率下,ZnSe 和 ZnS 材料的波前畸变显著增大,而金刚石由于其较好的热稳定性,波前畸变较小。

通过将波前函数与 Zernike 基函数进行拟合,提取主要的低阶和高阶像差项,从而得到波前畸变的定量描述。图 15 为计算得到的 Zernike 系数。

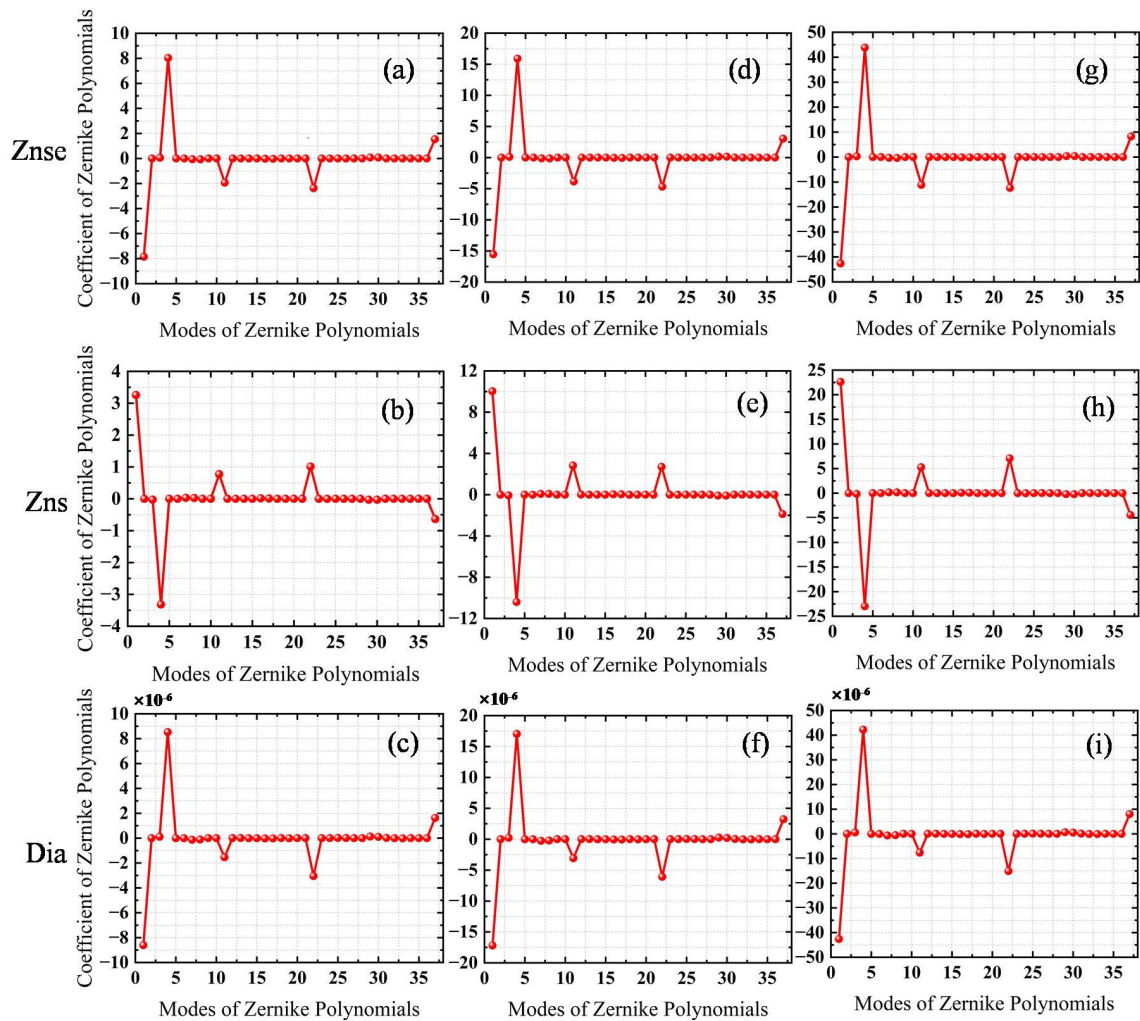


Figure 15. Zernike polynomials of different materials under different laser powers of (a~c) 10 kW, (d~f) 20 kW and (g~i) 50 kW, respectively

图 15. 分别在(a~c) 10 kW、(d~f) 20 kW 和(g~i) 50 kW 激光功率下不同材料的泽尔尼克多项式

Table 2. Partial Zernike polynomials

表 2. 部分 Zernike 多项式

j	n	m	$Z_j(\rho, \theta)$	Aberration
1	0	0	1	Piston
4	2	0	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	Focus
11	4	0	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Primary spherical aberration
22	6	0	$\sqrt{7}(20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1)$	Secondary spherical aberration

主要影响的是第一项、第四项、第十一项和第二十二项，对应的分别是平移、离焦、初级球差和次级球差，具体形式如表 2 所示。

ZnSe 材料在 50 kW 下的波前畸变相较于 10 kW 和 20 kW 增加显著，尤其是球面像差。这表明 ZnSe 在高功率下的热膨胀效应较为明显，导致光束焦点发生变化，影响了系统的聚焦性能。ZnS 在 50 kW 下的波前畸变尤其显著，球面像差和高阶像差的增大较为明显。这种效应表明 ZnS 的热导率较低，导致热量在透镜内积聚，产生较大的热变形，进而影响光束的传播。相较于 ZnSe 和 ZnS，金刚石表现出较小的

波前畸变。即使在 50 kW 下，金刚石的 PV 值和 RMS 值增长也较为平缓。这是因为金刚石的高热导率和低热膨胀系数使其能更有效地分散热量，从而减少热引起的波前畸变。

在高功率激光照射下，ZnS 和 ZnSe 材料的热膨胀效应导致较大的波前畸变，而金刚石的优异热性能使其在高功率下表现出更好的波前能力。高功率下的波前畸变，尤其是在 ZnS 和 ZnSe 中，对系统的光学性能影响大，因此在高功率应用中，需要更高效的热管理设计和材料选择来优化性能。

Table 3. Partial structural parameters of spherical mirror
表 3. 球面镜部分结构参数

Material	Power/W	Curvature radius /mm	Thickness/mm
ZnSe	10 k	-810.741	199.968
	20 k	-0.05	587.492
	50 k	2.415×10^4	199.968
ZnS	10 k	1.614	767.052
	20 k	117.436	500.052
	50 k	0.011	107.317
Diamond	10 k	1577.093	399.884
	20 k	-34.647	499.980
	50 k	13.1	100.003

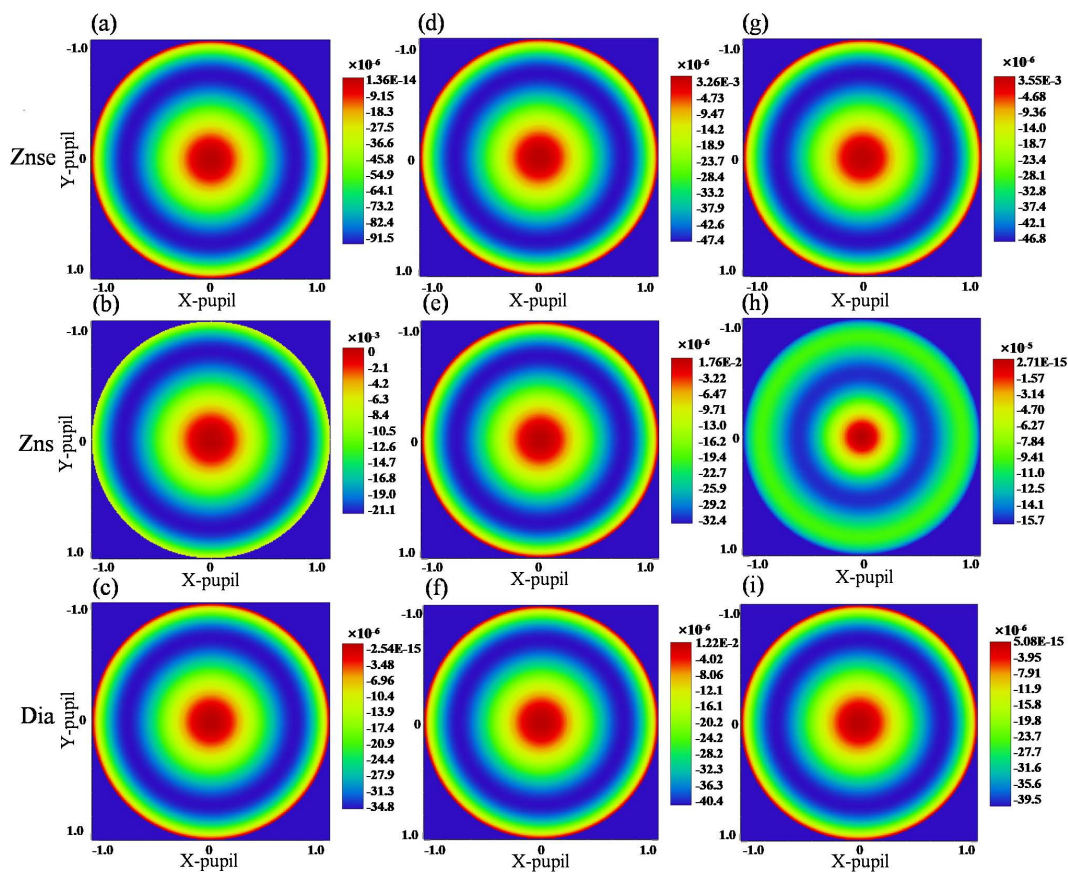


Figure 16. Wavefront images compensated by spherical mirrors for different materials under different laser powers of (a~c) 10 kW, (d~f) 20 kW and (g~i) 50 kW, respectively

图 16. 分别在(a~c) 10 kW、(d~f) 20 kW 和(g~i) 50 kW 激光功率下不同材料使用球面镜补偿后的波前图

通过采用球面镜和非球面镜进行波前畸变补偿,对比分析两种补偿方法在不同条件下的补偿效果。球面镜的补偿原理基于其表面曲率的均匀性和对称性,通过调整曲率半径和位置来校正低阶像差,如离焦等。补偿透镜的设计基于热效应影响后的光学参数,确保补偿效果反映了实际热环境下的系统性能。

球面镜补偿结果如图 16 所示,使用球面镜进行波前补偿时,尽管球面镜补偿后的波前 PV 值和 RMS 值都能降到零,这表明波前的总畸变得到了修正,但波前图的表面形状却呈现不规则的起伏。球面镜作为一种具有固定曲率的几何形状,它的补偿能力通常受到其简单对称结构的限制。如表 3 所示,小曲率半径通常使透镜的光线偏折更显著,但也更容易引入像差。为了补偿系统像差,可能需要对高弯曲表面的部分区域进行微调,从而导致表面偏离理想规则形状。尤其是在面对复杂的热透镜效应或不规则的折射率分布时,球面镜无法精确适应局部的光程差变化,因此补偿后的波前图表面通常会出现较大的不规则性和起伏。

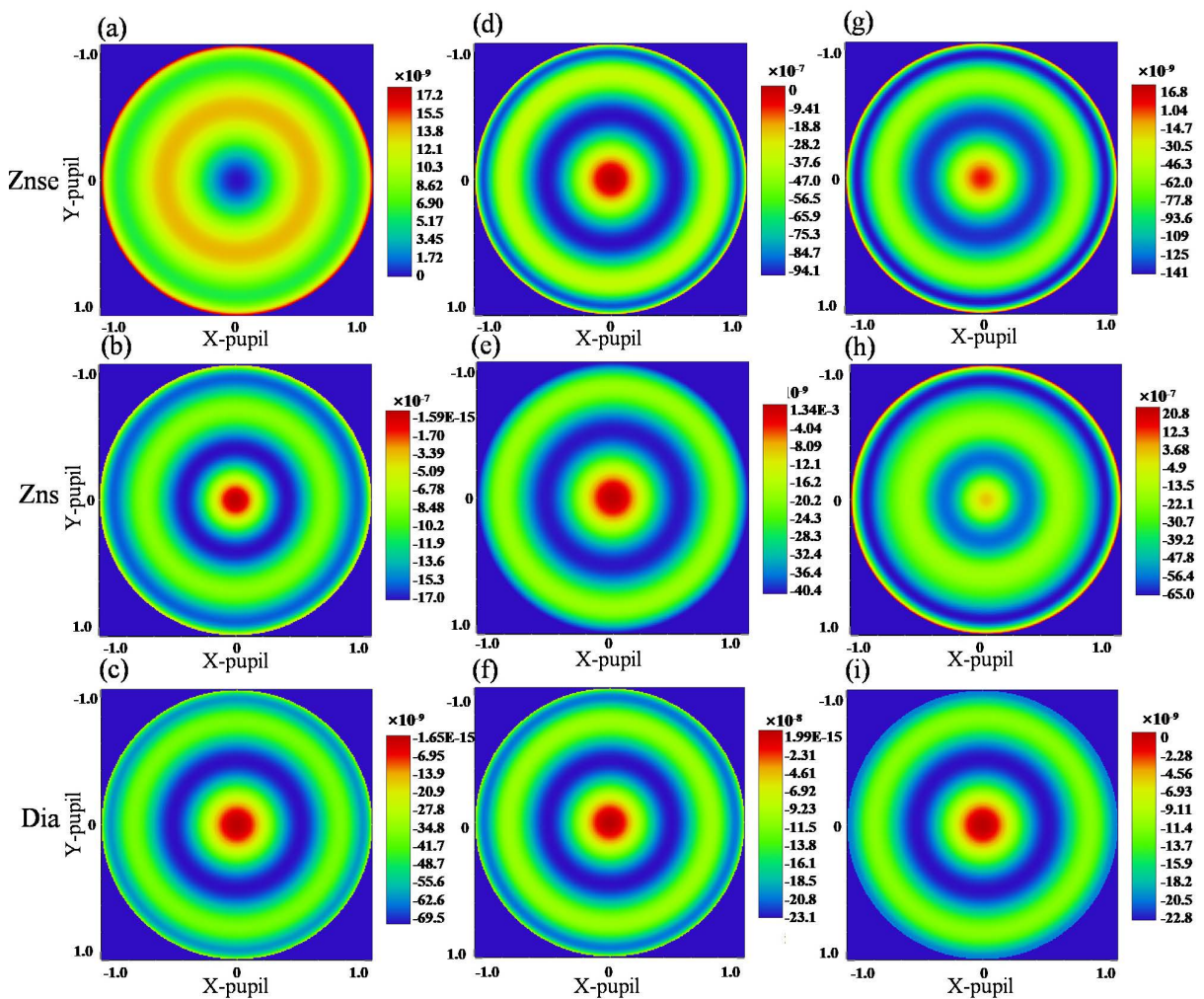


Figure 17. Wavefront images of different materials compensated with non-spherical mirrors under different laser powers of (a~c) 10 kW, (d~f) 20 kW and (g~i) 50 kW, respectively

图 17. 分别在(a~c)10 kW、(d~f) 20 kW 和(g~i) 50 kW 激光功率下不同材料使用非球面镜补偿后的波前图

与球面镜不同,非球面镜的补偿基于其复杂的表面形状和高设计自由度,能够通过调整圆锥系数和高阶多项式系数优化表面形状生成相反的波前,从而抵消畸变,使补偿后的波前更加平坦。通过将非球

面镜的圆锥系数等设置成变量并进行优化,其中4阶项、6阶项、8阶项和10阶项为非球面系数的高阶值,优化后的部分参数如表4所示,非球面镜在4阶项、6阶项、8阶项和10阶项等高阶项系数变化量级较大。从图17可以看出,边缘区域的波前畸变显著减小,光程差分布更加均匀,这表明非球面镜能够有效地调整波前的复杂形状,特别是在补偿高阶畸变时,其优化效果远优于球面镜。

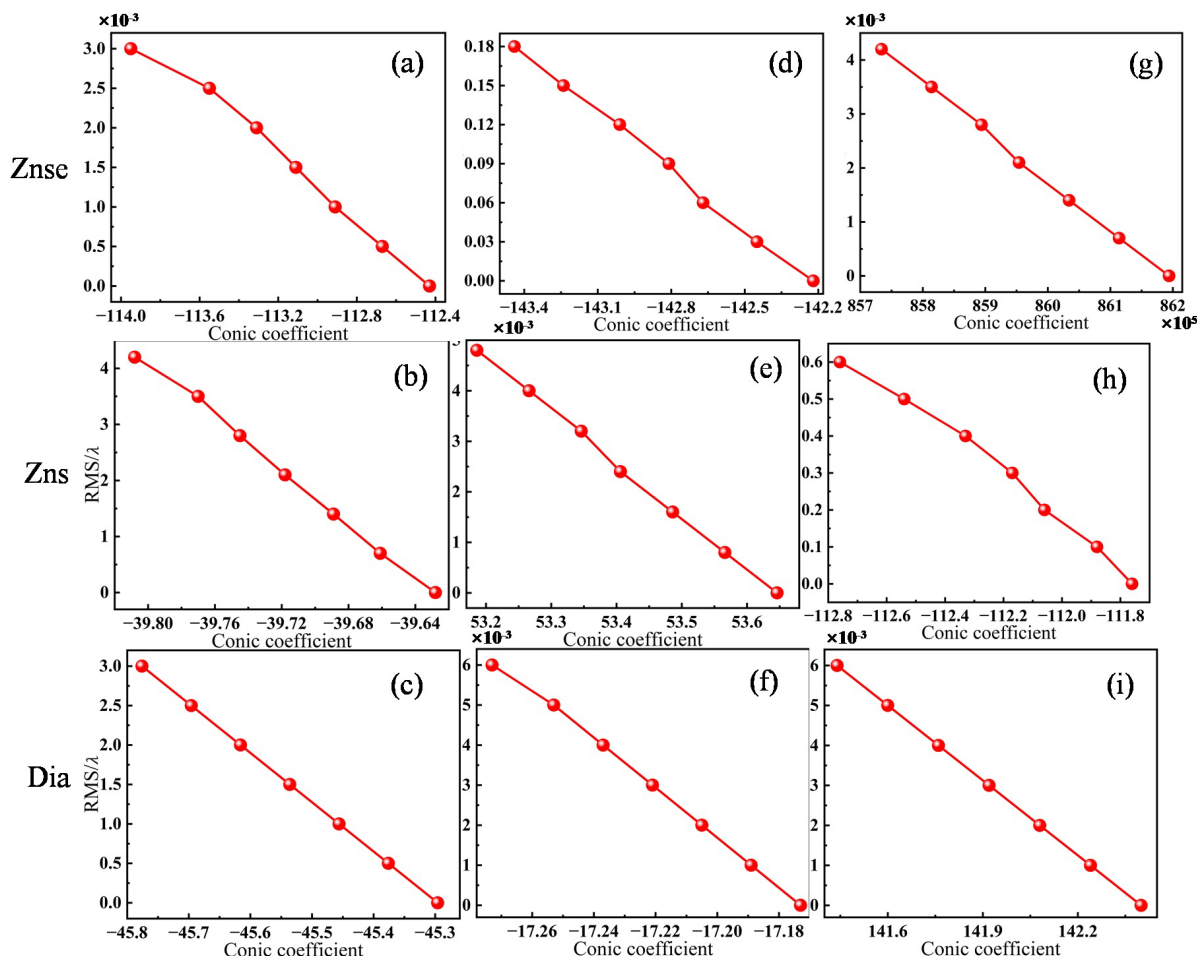


Figure 18. Optimization effect diagram of RMS values of different materials with varying cone coefficients under different laser powers of (a~c) 10 kW, (d~f) 20 kW and (g~i) 50 kW, respectively

图 18. 分别在(a~c) 10 kW、(d~f) 20 kW 和(g~i) 50 kW 激光功率下不同材料 RMS 值随圆锥系数变化的优化效果图

在不同功率下(10 kW、20 kW、50 kW),非球面镜的补偿效果均表现出良好的波前修正能力,尤其是在高功率条件下,波前形状的改善尤为显著。从图18中可以看出,RMS 值随圆锥系数的变化而逐渐减小,最终降到0,表明通过调整圆锥系数,非球面镜能够有效校正系统中的波前畸变,包括低阶和高阶像差,同时波前达到理想平面状态,光学系统的成像质量显著提升。

在球面镜设计中,曲率半径的变化范围较大(如-810.741 mm、24150 mm、1577.093 mm、-0.05 mm、0.011 mm),这种不均匀的曲率变化导致其表面形状的调整能力有限,难以优化复杂的波前畸变。尽管优化后波前的 PV 值和 RMS 值接近零,但球面镜的补偿效果在波前面型上仍存在显著的不规则性,尤其是在高阶像差(如彗差、像散和三叶像差)的校正上表现较差。数据显示,球面镜补偿后的波前图中,边缘区域的光程差分布不均匀,色带较宽且颜色变化明显,表明其波前形状仍存在较大的波动。

相比之下,非球面镜设计通过引入圆锥系数,能够更灵活地调整表面形状,从而精确匹配波前畸变

的分布。非球面镜的圆锥系数变化相对平滑,表明其表面形状的调整更加均匀。结果显示,非球面镜补偿后的波前图表面较为平坦,光程差分布均匀,色带较窄且颜色变化平缓。此外,非球面镜补偿后的高阶 Zernike 系数(如 4 阶、6 阶、8 阶和 10 阶)均显著低于球面镜,表明其能够有效消除高阶像差和局部不均匀的光程差,使波前形状趋于理想的平面。综上所述,球面镜由于曲率半径变化不均匀,其表面形状的调整能力有限,导致波前面型存在较大的不规则性;而非球面镜通过引入圆锥系数,能够更灵活地调整表面形状,从而显著提升波前的平坦性和补偿效果。

Table 4. Partial structural parameters of non-spherical mirror
表 4. 非球面镜部分结构参数

Material	Power/W	Curvature radius/mm	Thickness/mm	Conic coefficient	4 th order term	6 th order term	8 th order term	10 th order term
ZnSe	10 k	-810.706	200	-112.949	-2.167×10^{-12}	3.475×10^{-13}	1.208×10^{-14}	9.823×10^{-16}
	20 k	0.024	610.940	-142.244	3.855×10^6	5.866×10^{11}	-7.168×10^{17}	2.218×10^{23}
	50 k	-2.945×10^5	269.190	8.619×10^7	2.237×10^{-8}	9.895×10^{-11}	3.368×10^{-12}	-8.550×10^{-13}
ZnS	10 k	0.406	795.869	-39.628	-3871.214	7.211×10^9	-1.749×10^8	4.410×10^{13}
	20 k	117.444	500.869	53.646	1.748×10^{-6}	1.089×10^{-7}	7.931×10^{-8}	-2.286×10^{-7}
	50 k	0.175	802.999	-111.763	-2.181×10^6	2.863×10^{12}	4.393×10^{-13}	1.451×10^{-7}
Diamond	10 k	1577.196	399.899	-45.296	1.734×10^{-8}	2.156×10^{-11}	2.686×10^{-12}	-3.225×10^{-13}
	20 k	-34.623	506.861	-17.173	2.449×10^{-4}	1.821×10^{-4}	1.921×10^{-3}	-0.038
	50 k	13.107	102.649	142.395	0.018	0.074	0.769	-121.715

4. 结论

本文主要针对 CO₂ 激光器中高功率导致的热透镜效应,将有限元方法与光线追踪相结合,建立了元件/模块附近空气的温升和对流模型,分析了光学元件与附近气体之间的传热过程。利用该模型,分析了光学元件的热变形及其对光学系统影响。结果表明,ZnSe 和 ZnS 材料由于较高的热膨胀系数和低热导率,容易产生较大温升和形变,导致波前畸变和光学性能下降。ZnS、ZnSe 和金刚石透镜在 5 kW 功率下的形变量分别为 13.7 μm、1.02 μm、0.00291 nm。随着功率增大到 50 kW,ZnS 透镜形变更明显,分别是 204 μm、15 μm、0.0288 nm。相比之下,金刚石具有极低的热膨胀系数和高热导率,能够有效分散热量,形变几乎为零,波前保持稳定,因此金刚石更适合用于高功率激光应用中的透镜材料,ZnSe 次之。在此基础上,本研究基于波前优化技术,设计了一种补偿透镜来补偿热效应导致的波前畸变。并分析了球面镜和非球面镜的补偿效果。分析表明,球面镜和非球面镜均能对波前畸变进行有效补偿。在 50 kW 功率下,将三种透镜的 RMS 值分别从 1.4773 λ、5.2824 λ、 4.9372×10^{-6} λ 优化到 0,非球面镜相较于球面镜具有更大的设计自由度,能够通过圆锥系数和高阶多项式系数灵活调节光学表面的形状,从而更有效地应对高阶波前误差。因此,非球面镜补偿后的波前面型更为平坦,补偿效果显著优于球面镜。

基金项目

国家自然科学基金(61975217);上海市科委地方高校能力建设项目(22010503200)。

参考文献

- [1] Kwang Il, P., Hyo Jin, P., Yu Ryong, K., Du Hen, Y. and Jong Ho, A. (2025) Improved Six-Temperature Model and

- Simulation for Dynamics of High-Power TEA CO₂ Lasers Considering Effect of Hydrogen. *Optics & Laser Technology*, **181**, Article ID: 111692. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111692>
- [2] Zhang, W., Shen, X., Shi, F., Song, C., Qiao, S., Ruan, N., et al. (2024) Material Migration and Damage Characteristics of Fused Silica Optical Surface Treated by CO₂ Laser/Short—Pulse Ultraviolet Laser. *Optics & Laser Technology*, **175**, Article ID: 110867. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110867>
 - [3] Ke, X., Liu, H., Gan, L., Chen, X., Chen, Y., Xi, S., et al. (2024) Laser Processing of Highly Conductive Graphene Electrodes for Micro-Supercapacitors. 2024 25th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Tianjin, 7-9 August 2024, 1-5. <https://doi.org/10.1109/icept63120.2024.10668620>
 - [4] Ramirez, I., Bertolini, G.R., Candemil, A.P., Sousa-Neto, M.D. and Souza-Gabriel, A.E. (2023) Chemical and Morphological Analysis of Dentin Irradiated by Different High-Power Lasers: A Systematic Review. *Lasers in Medical Science*, **38**, Article No. 255. <https://doi.org/10.1007/s10103-023-03912-0>
 - [5] Boujelbene, M., El Aoud, B., Bayraktar, E., Elbadawi, I., Chaudhry, I., Khaliq, A., et al. (2021) Effect of Cutting Conditions on Surface Roughness of Machined Parts in CO₂ Laser Cutting of Pure Titanium. *Materials Today: Proceedings*, **44**, 2080-2086. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.179>
 - [6] 陆培华, 王润文. 高功率 CO₂ 激光器全反射镜热应力变形解析分析[J]. 中国激光, 2002, 29(3): 201-204.
 - [7] 李隆, 史彭, 李东亮, 等. 高功率 CO₂ 激光器输出窗热效应的研究[J]. 激光技术, 2004, 28(5): 510-513.
 - [8] Zhu, D., Zuo, D., Zhou, X., Li, S. and Liu, J. (1999) Effect of Cooling Gas on the Thermal Lens Effect of the Focusing Lens for a High-Power CO₂ Laser. *SPIE Proceedings*, **3862**, 143-147. <https://doi.org/10.1117/12.361175>
 - [9] Takahashi, H., Kimura, M. and Sano, R. (1989) Optical Distortion of Transmissive Optics at High Power CO₂ Laser Irradiation. *Applied Optics*, **28**, 1727-1730. <https://doi.org/10.1364/ao.28.001727>
 - [10] 任温馨, 陈海清, 王磊. 微变形镜补偿激光器腔内热畸变的研究[J]. 光学与光电技术, 2007, 5(4): 8-11.
 - [11] Xiang, R.J., Du, Y.L., Xu, H.L., Li, G.H., Wu, J. and Zhang, K. (2015) Phase Aberration Correcting of a Slab MOPA Solid State Laser with Combined Deformable Mirrors. *High Power Laser and Particle Beams*, **27**, Article ID: 071009. <https://doi.org/10.3788/hplpb20152707.71009>
 - [12] Nath, A.K., Reghu, T., Paul, C.P., Ittoop, M.O. and Bhargava, P. (2005) High-Power Transverse Flow CW CO₂ Laser for Material Processing Applications. *Optics & Laser Technology*, **37**, 329-335. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2004.04.015>
 - [13] Ukar, E., Lamikiz, A., López de Lacalle, L.N., del Pozo, D. and Arana, J.L. (2010) Laser Polishing of Tool Steel with CO₂ Laser and High-Power Diode Laser. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **50**, 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.09.003>
 - [14] Williams, R.J., Kitzler, O., Bai, Z., Sarang, S., Jasbeer, H., McKay, A., et al. (2018) High Power Diamond Raman Lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **24**, 1-14. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2018.2827658>
 - [15] Nakashima, T., Ohmura, Y., Ogata, T., Uehara, Y., Nishinaga, H. and Matsuyama, T. (2008) Thermal Aberration Control in Projection Lens. *SPIE Proceedings*, **6924**, 659-667. <https://doi.org/10.1117/12.772586>
 - [16] Rall, P.L.L. and Pflaum, C. (2021) Simulation and Compensation of Thermal Lensing in High-Power Optical Systems. *Computational Optics 2021*, 13-17 September 2021, 61-69. <https://doi.org/10.1117/12.2600184>
 - [17] 张阔, 陈飞, 李若澜, 等. 大功率 CO₂ 激光器输出窗口热性能分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 116-121.
 - [18] Zhu, G., Zhu, X., Wang, M., Feng, Y. and Zhu, C. (2014) Analytical Model of Thermal Effect and Optical Path Difference in End-Pumped Yb:YAG Thin Disk Laser. *Applied Optics*, **53**, 6756-6764. <https://doi.org/10.1364/ao.53.006756>
 - [19] Dietrich, T., Piehler, S., Röcker, C., Rumpel, M., Abdou Ahmed, M. and Graf, T. (2017) Passive Compensation of the Misalignment Instability Caused by Air Convection in Thin-Disk Lasers. *Optics Letters*, **42**, 3263-3266. <https://doi.org/10.1364/ol.42.003263>
 - [20] Diebold, A., Saltarelli, F., Graumann, I.J., Saraceno, C.J., Phillips, C.R. and Keller, U. (2018) Gas-lens Effect in Kw-Class Thin-Disk Lasers. *Optics Express*, **26**, 12648-12659. <https://doi.org/10.1364/oe.26.012648>
 - [21] Wang, Z.Y., Chen, K., Chen, T., Lei, H. and Zuo, T.C. (2001) Atmospheric Thermal Lens Induced by High-Power CO₂ Laser Beams in Laser Materials Processing. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **37**, 218-223. <https://doi.org/10.1109/3.903071>
 - [22] Saathof, R., Schutten, G.J.M., Spronck, J.W. and Munnig Schmidt, R.H. (2015) Actuation Profiles to Form Zernike Shapes with a Thermal Active Mirror. *Optics Letters*, **40**, 205-208. <https://doi.org/10.1364/ol.40.000205>
 - [23] 施胤成, 闫怀德, 宫鹏, 等. 基于 Zernike 系数优化模型的光学反射镜支撑结构拓扑优化设计方法[J]. 光子学报, 2020, 49(6): 203-214.
 - [24] 孟晓辰, 祝连庆. 用于大孔径凸非球面检测的部分补偿透镜的优化设计[J]. 应用光学, 2016, 37(5): 747-751.

-
- [25] 赵瑞, 陈露楠, 孔梅梅, 等. 用于波前补偿的三液体透镜阵列的设计分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 260-265.
- [26] Sigmund, O. (2001) A 99 Line Topology Optimization Code Written in Matlab. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **21**, 120-127. <https://doi.org/10.1007/s001580050176>
- [27] Peng, T., Dai, C., Lou, J., Cui, Y., Tao, B. and Ma, J. (2020) A Low-Cost Deformable Lens for Correction of Low-Order Aberrations. *Optics Communications*, **460**, Article ID: 125209. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.125209>
- [28] Penndorf, R. (1957) Tables of the Refractive Index for Standard Air and the Rayleigh Scattering Coefficient for the Spectral Region between 0.2 and 200 μ and Their Application to Atmospheric Optics. *Journal of the Optical Society of America*, **47**, 176-182. <https://doi.org/10.1364/josa.47.000176>
- [29] Shin, J.S., Cha, Y., Cha, B.H., Lee, H.C., Kim, H.T. and Lee, J.H. (2016) Simulation of the Wavefront Distortion and Beam Quality for a High-Power Zigzag Slab Laser. *Optics Communications*, **380**, 446-451. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.06.052>
- [30] Lv, M., Hu, M.Y., Li, Z.Y., et al. (2020) Research on Detection Method of Large Relative Caliber Off-Axis Convex Paraboloid. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, **37**, 287-293.
- [31] Graf, T., Wyss, E., Roth, M. and Weber, H.P. (2002) Compensation of Thermal Effects in High-Power Solid State Lasers. *SPIE Proceedings*, **4762**, 22-26. <https://doi.org/10.1117/12.478640>
- [32] Liang, Z.J., Yang, Y.Y., Zhao, H.Y. and Liu, S.A. (2022) Advances in Research and Applications of Optical Aspheric Surface Metrology. *Chinese Optics*, **15**, 161-186. <https://doi.org/10.37188/co.2021-0143>