

文章编号 1004-924X(2015)11-3097-10

## 高功率激光热效应对合束系统的影响

孙 毅<sup>1,2\*</sup>, 高云国<sup>1</sup>, 邵 帅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:**提出利用镀膜合束的方法对三路光束进行合束用于高功率红外激光合束系统设计。考虑系统中关键元件使用的红外材料 ZnSe 易受热效应影响,采用光机热耦合分析方法,研究了在温度边界条件固定时,各波段激光所产生的耦合热效应对各路激光波前畸变的影响,同时定性分析了系统中存在的激光偏置热效应。研究结果显示,系统中各波段的激光波前畸变均方根值(RMS)均满足设计要求(各波段波前畸变小于  $\lambda/8$ );激光偏置造成的波面高频成分增大了长波激光波前畸变量,但高频成分对系统波前畸变影响依然满足要求;轴向温差可在 35 s 达到平衡,对光束波前造成主要影响的是各块镜片的面型畸变。根据分析结果搭建了实验平台,利用系统中短波 400 W 激光进行实验,采集了该条件下的面型并与仿真结果进行了对比,实验结果验证了该分析方法计算结果的准确性。

**关键词:**激光干扰;合束系统;激光热效应;光束偏置;Zernike 拟合

**中图分类号:** TN977; TN243 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152311.3097

## Influence of high power laser thermal effect on beam combination system

SUN Yi<sup>1,2\*</sup>, GAO Yun-guo<sup>1</sup>, SHAO Shuai<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: sunyi1987@163.com*

**Abstract:** A beam combination method based on the optical coating was proposed for three light paths to design a high power infrared laser multi-band beam combination system. As the ZnSe used as substrate materials of a beam combination mirror was easy to be susceptible to thermal effects, the optical-mechanical-thermal coupling analysis was used to research the influence of coupled thermal effect caused by laser irradiation in different wave bands on laser wavefront distortion of each band under the fixed temperature boundary conditions. Meanwhile, the thermal effect caused by beam biased was analyzed qualitatively. Simulation results show that the wavefront distortion (Root Mean Square, RMS) of each band laser is able to satisfy the design requirements (the wavefront distortion needs to be less than  $\lambda/8$ ). The high-frequency component increases the distortion of a long wave laser, but it still meets the system requirement. The axial temperature difference reaches the equilibrium after 35 s, so the main factor of wavefront distortion is the surface distortion of every mirror. An experimental testbed was set up based on the analysis results, and the experiments were carried out on a 400 W short wavelength laser. The surface data were obtained and compared with that

收稿日期:2015-02-20;修订日期:2015-03-27.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(No. 057X22C050)

of the simulation, and the results validate the feasibility of the proposed analytical method.

**Key words:** laser jamming; beam combination system; laser thermal effect; beam biased; Zernike fitting

## 1 引言

目前,利用激光对敌方光电设备进行干扰是各国激光领域研究的热点问题。由于无法获知对方光电设备工作波段,使用单一波段激光输出很难达到预想效果。为了解决这一问题,提出了多波段激光合束方式,利用 ZnSe 材料透过波段宽的特点以及镀膜技术,将不同波段激光合成为一束光束进入发射系统。该套系统光路简单,设备体积小,满足了在未知情况下的干扰需求<sup>[1-2]</sup>。

ZnSe 材料对  $0.8\sim 12\ \mu\text{m}$  激光有着 60% 的本征透过率,是理想的红外波段激光合束材料<sup>[3]</sup>。但是其固有热传导系数相对于其他光学材料较小,所以对温度变化更为敏感。合束镜的光学性能直接关系到合束系统的出光质量,对于目前高功率激光系统,长波  $\text{CO}_2$  激光功率可达上万瓦以上,经过光学一级扩束后光斑直径可达到 100 mm 以上,系统热效应明显。所以在系统设计之初对合束系统进行光机热一体化分析很有必要。

本文采用光机热一体化分析<sup>[4-5]</sup>方法,对在激光发射过程中热效应对激光波前的影响进行了分析,分析结果表明,热效应导致波前畸变满足合束系统要求。搭建了实验平台,利用小功率激光验证了该分析方法的准确性,对高功率红外激光合束系统设计及红外材料热光分析提供了参考。

## 2 合束系统光路

激光合束系统光路如图 1 所示,从激光器输出的各波段激光进入到合束模块中(其中红外长波激光需首先进入扩束变倍模块)。

合束镜 1(图中 BC mirror1)透射长波红外激光,反射中波红外激光,经过无氧铜反射镜改变光束角度后,进行第二次合束;合束镜 2(图中 BC mirror2)透射长、中波红外激光,反射短波可见光激光。其中长波激光光斑直径约为 100 mm,中

波和短波激光中心水平偏置长波激光中心 35 mm,光斑直径为 20 mm。在实际工程应用中,采用波段为  $10.6\ \mu\text{m}$  高功率长波激光,波段为  $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 、功率为 10 W 的中波激光和波段为  $0.808\ \mu\text{m}$ 、功率为 400 W 的短波激光。

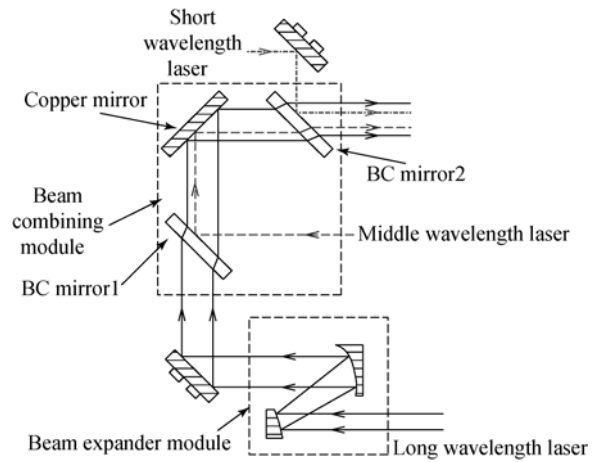
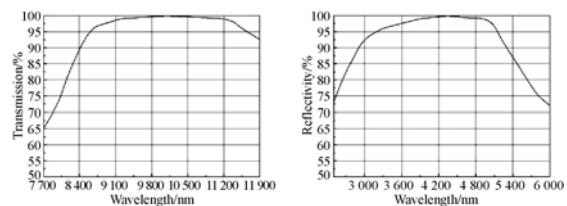


图 1 合束系统光路

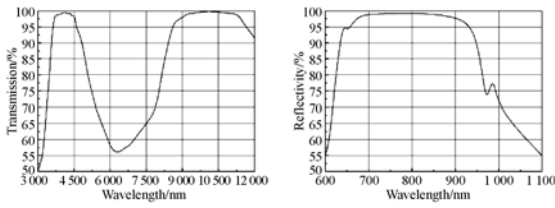
Fig. 1 Light path of beam combination

合束镜 1 镀对长波高透膜,对中波高反膜成长波和中波激光合束;合束镜 2 镀对长波,中波波段高透膜,对短波波段高反膜达到 3 束激光合束的目的<sup>[1]</sup>。图 2(a)为经过光学镀膜后对长波波段透射率、对中波反射率的检测结果;图 2(b)为合束镜 2 对长波、中波波段透射率,对短波反射率的检测结果。可以看出在  $10.6\ \mu\text{m}$  波段,两块合束镜透过率达到 99% 以上,对中波激光以及短波激光反射率达到 99.5% 以上,对中波透过率达到 99% 以上。



(a)合束镜 1 镀膜检测曲线

(a)Curves of coating detecting of BC mirror1



(b)合束镜 2 镀膜检测曲线

(b) Curves of coating detecting of BC mirror2

图 2 镀膜检测曲线

Fig. 2 Curves of coating detecting

### 3 系统热光学分析方法

利用瞬态热传导方程以及热弹性方程可以计算出合束镜吸收激光能量产生的温度分布热应力,将有限元法获取的离散数据通过 Matlab 程序即可求解热效应所带来的光程差变化。

#### 3.1 热变形模型

激光辐照镜体表面,对于各向同性均匀材料,瞬态温度场的求解可以采用热传导微分方程来表示:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

式中:  $T$  为镜体  $t$  时刻的温度值;  $k, \rho, c$  分别为材料的导热系数、密度值以及比热容。根据实际工作条件,合束镜表面有受激光辐照所产生的热流边界条件,也有对流换热发生,所以其边界条件为:

$$\begin{cases} k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Sigma} = -[(1-\epsilon) I(x, y, z) / S - h_c (T_s - T_c)] \\ k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Sigma_1} = h_c (T_s - T_c) \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $T_c$  为环境温度;  $T_s$  为激光入射面表面温度;  $h_c$  为对流换热系数;  $\epsilon$  为合束镜透射率;  $I$  为辐照光源光强;  $S$  为激光辐照面积;  $\Sigma_1$  为对流换热区域。

由于夹持等静力约束条件,使得不均匀的温度场产生热应力效应,使得镜面面型产生变化,变形量可由热弹方程求解:

$$\begin{cases} \nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e}{\partial r} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_t \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \\ \nabla^2 u_z + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e}{\partial z} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_t \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $u_r$  和  $u_z$  表示镜体沿径向和轴向的热变形量;  $e$  为热应变;  $\alpha_t$  为材料热膨胀系数;  $\nu$  为泊松比;  $T$  为温度场分布函数。目前,关于有限元分析解决热固耦合问题已得到广泛应用<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 热致波前畸变分析

波前畸变常用光程差来表示,假设一束平面波光束沿  $Z$  轴传播如图 3 所示。

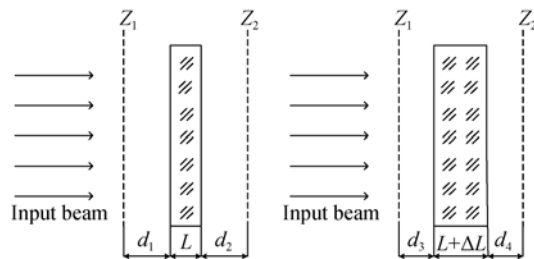


图 3 热效应模型

Fig. 3 Model of thermal effects

在光束通过系统时,热效应带来的是镜面畸变<sup>[5]</sup>以及折射率的变化,两个因素导致光程发生变化,对光束可能产生聚焦,偏移等影响。光程差公式为:

$$\Delta D_{OPD} = \Delta D_{\Delta L} + \Delta D_{\Delta T} = \Delta L (n_0 - 1) + \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^L T dz, \quad (4)$$

式中:  $\Delta L$  为面型畸变带来的厚度变化;  $n_0$  为常温下镜体材料折射率;  $\partial n / \partial T$  为温度折射率系数; 忽略应力双折射产生的光程差变化<sup>[7]</sup>。将离散的有限元数据输入 Matlab 程序中,计算出在热力耦合下的面型导致的光程差  $\Delta D_{\Delta L}$  以及轴向折射率梯度产生的光程差  $\Delta D_{\Delta T}$ , 即可利用  $\Delta D_{OPD}$  的均方根值评价系统波前。

### 4 合束系统热畸变分析

文中合束系统通过 2 块 ZnSe 材料的合束镜进行 2 次合束,以及通过一块无氧铜反射镜进行光路转折。ZnSe 材料对温度较为敏感,尤其在高

功率激光辐照的条件下,产生的径向温差和轴向温差对激光光束质量产生一定影响<sup>[8]</sup>。

#### 4.1 初始边界条件

系统中对热效应影响明显的是高功率长波段 CO<sub>2</sub> 激光。通过透过率检测曲线可以看出,长波激光透过率达到 99% 以上。根据工程实际应用及测试,计算出长波激光热流密度为 4 480 W/m<sup>2</sup>;中波激光热吸收率为 0.5%,功率密度为 112 W/m<sup>2</sup>;短波激光热吸收率为 0.3%,功率密度为 2 714 W/m<sup>2</sup>。各激光入射角度均为 45°,假设吸收的功率作为热流密度均匀分布于光照区,激光最大照射时间为 90 s,在自然对流的条件下,对流换热系数选择为 14 W·m<sup>-2</sup>·°C<sup>[9]</sup>,初始温度为 20°C,镜体长宽高为 200 mm×140 mm×20 mm,对于短时间辐照的情况,可以忽略镜架基座与镜体换热。材料属性如表 1 所示。

表 1 材料的主要参数

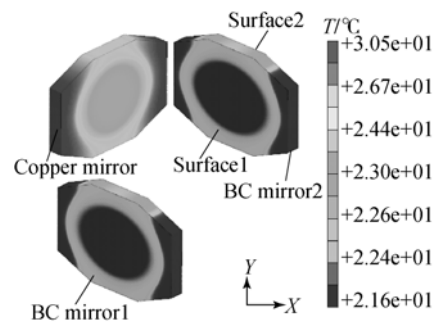
Tab. 1 Main parameters of material

Parameter	ZnSe	Copper
Density/(kg·m <sup>-3</sup> )	5 270	8 940
Thermal conductivity coefficient/(W/m·K <sup>-1</sup> )	18	401
Thermal expansion/(°C <sup>-1</sup> )	7.1×10 <sup>-6</sup>	1.65×10 <sup>-5</sup>
Specific heat/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	339	385
Poisson ratio	0.28	0.34
Elastic module/(N·m <sup>-2</sup> )	6.7210 <sup>10</sup>	1.110 <sup>11</sup>

#### 4.2 温度场分析

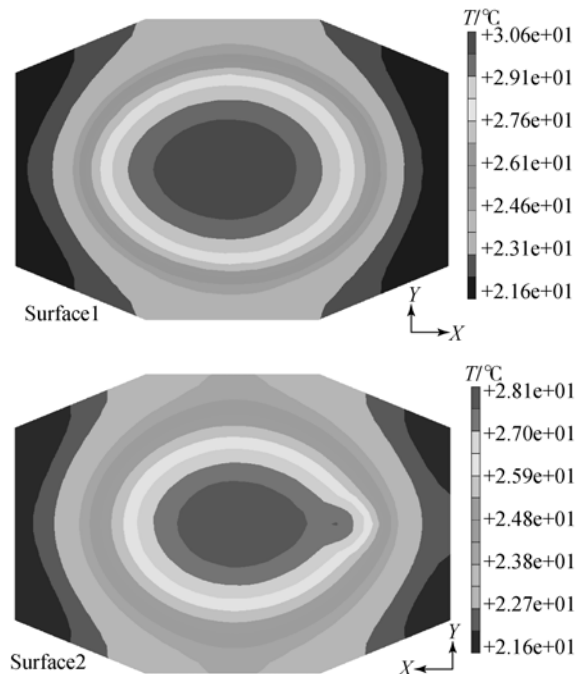
将边界条件输入到有限元分析软件中,为便于后续进行结构分析,热模型和结构模型的网格节点以及单元一一对应,以 5 s 为步长进行瞬态热分析。图 4 为合束镜组在激光辐照 90 s 后的瞬态温度场分布图。可以看出,在经过 90 s 的辐照后,最高温度达到 30.56°C,合束镜已经出现了明显的径向温差。但铜反射镜由于热传导系数较高,热量快速传递到镜体边缘,其最高温度仅为 22.88°C,同时其径向温差最大值仅为 0.57°C。经过仿真计算,铜镜在 65 s 即达到热平衡状态。以受到 3 路激光同时辐照的合束镜 2 作为主要研究对象,分析激光辐照后的热效应。对合束镜 2 受激光辐照的 2 个镜面进行编号:将长波激光以及中波激光入射面标为 Surface1,将反射短波激

光的镜面标为 Surface2,如图 4(a)所示。图 4(b)为经过 90 s 辐照后 Surface1 与 Surface2 的温度场分布。可以看出,中波激光由于功率密度较小,所以对镜子的温度场分布影响较小,但是,功率密度为 2 714 W/m<sup>2</sup> 的短波激光对镜面温度场分布影响明显。由于热传导作用是相互进行的,通过仿真分析发现,在 54 s 以前,Surface2 最高温度为短波激光辐照几何中心处;在 54 s 后,长波激光的热量累积过程超过短波激光,Surface2 最高温度逐渐变换到几何中心处。



(a) 合束镜组 90 s 温升云图

(a) Cloud picture of temperature of beam combination system



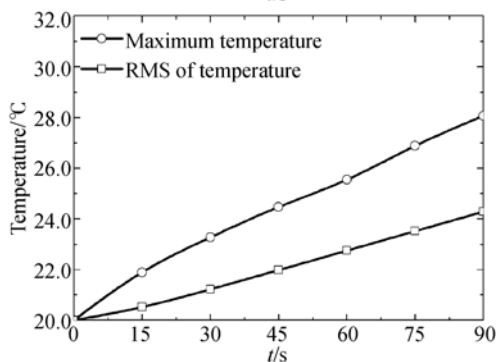
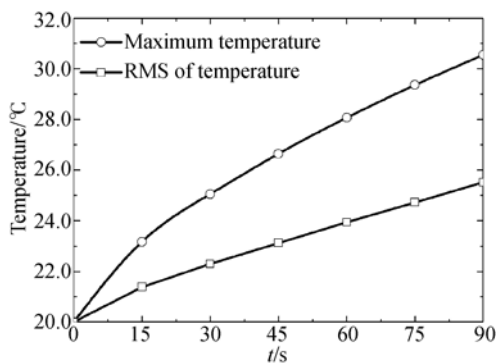
(b) 合束镜 2 镜面温度场分布

(b) Thermal field of BC2 surface

图 4 温度场分布云图

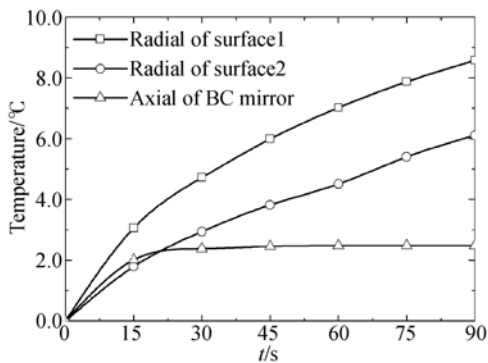
Fig. 4 Cloud pictures of thermal field

图 5(a)显示了合束镜 2 两个表面随时间变化的镜面最大温度值以及镜面温度均方根曲线<sup>[10]</sup>。图 5(b)给出了 2 个表面的径向温差变化数据以及轴向温差变化。虽然镜面最高温度上升很快,最高温度达到 30.56℃,但是镜面温度均方根 RMS 值曲率较小,在经过 90 s 辐照后最大值为 25.51℃。这也说明了热量大量集中在辐照区域,在镜面边缘等区域由于热传导不及时致使温升有限。图 5(b)中最高温度与边缘温度分布不均匀,较大的径向温差会导致更为严重的面型畸变,但其轴向温度梯度在 35 s 基本达到温差平衡状态。



(a) 镜面温升曲线

(a) Curve of surface temperature



(b) 径向与轴向温差

(b) Axial and radial temperature difference

图 5 温度变化分析

Fig. 5 Analysis of thermal variation

### 4.3 合束镜热变形分析

在实际应用中,对于光学透镜通常采用多点压块的方式对镜体进行夹持。为避免镜体与压块之间的刚性接触造成约束过于苛刻而对镜面的初始面型造成二次破坏,在压块和镜体之间选用聚四氟乙烯垫片以降低接触应力。在装调时首先利用压块定位镜片位置,然后利用螺钉进行预紧,最后通过干涉仪辅助装调完成镜片安装。在有限元分析中,将夹持条件简化为对节点的约束,图 6 所示为夹持方式示意图及有限元约束边界条件。

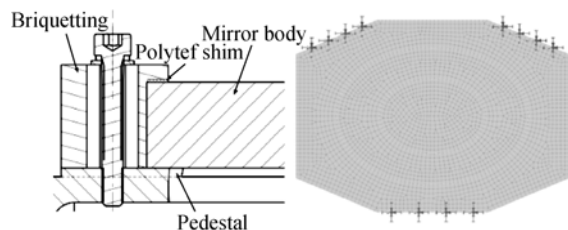
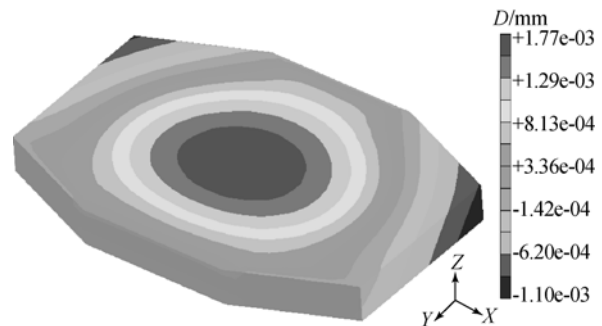


图 6 夹持结构示意图

Fig. 6 Schematic plot of clamping construction

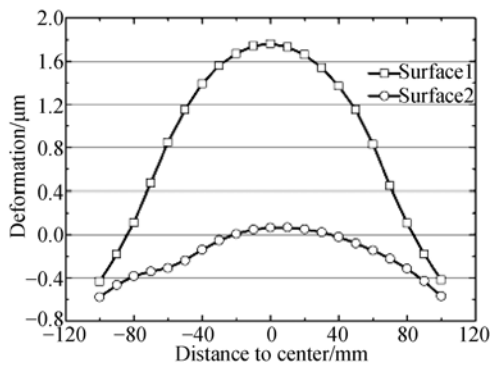
利用有限元软件的热-结构耦合分析手段,可以得到不同时刻的镜面热变形数据。图 7(a)为激光辐照 90 s 时合束镜 2 的 Z 方向热变形分布,其最大变形值为 1.77。取镜体 2 个镜面几何中心为零点沿图 7(a)中 X 轴正负方向各取 20 个点观察镜面变形状态如图 7(b)所示。

径向温差所造成的镜面畸变使合束镜近似于“正弯月”透镜。在 Surface2 的变形曲线中,横坐标 -60~ -40 区间内的变形呈非对称分布,主要是短波激光的辐照造成的热量积累导致局部变形量增大。



(a) 合束镜 2 热变形云图

(a) Thermal deformation of BC2



(b) 热变形径向分布

(b) Radial distribution of two surface

图 7 热变形分析

Fig. 7 Analysis of thermal deformation

## 5 合束系统热光学分析

对于这种高功率激光系统,热效应对光束质量的影响不可忽略,设计要求各波段激光经过该合束系统后波前畸变 RMS 均应小于  $\lambda/8$ (为各波段波长)。

### 5.1 合束系统光学分析

热效应对激光系统光程差的影响主要有径向温差引起的面型畸变和轴向温差引起的折射率梯度变化。ZnSe 材料在某一温度  $t$  下的折射率  $n_t$  是透过光波长和材料温度的函数:

$$n_t = 1.000\ 272 n_0 + \alpha(t_1 - 20), \quad (5)$$

式中:  $n_0$  为材料在  $20^\circ\text{C}$  时的相对折射率;对于长波激光其折射率为 2.402 8;对于中波激光其折射率为 2.433 9;  $\alpha$  为材料的折射率温度变化率,长波激光温度变化率系数为  $6.1 \times 10^{-5}$ ,中波激光为  $6.2 \times 10^{-5}$ 。

利用 Zernike 多项式分别拟合面型畸变以及折射率畸变,将拟合后的空间点的阵列进行相加后再次进行拟合,即可得到各波段光束的波前数据<sup>[11-14]</sup>。由图 1 可知在该合束系统中,不同激光通过的光路不尽相同。长波激光通过了完整的光路,而影响短波激光波前的只有合束镜 2 的一面。所以热效应对各波段激光本身所产生的影响也要逐一累加计算。计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知,中波激光以及短波激光波前畸变 RMS 值较小,主要由于 2 束激光口径小,同时在光路中的光程较短,所以热效应对中波激光以

及短波激光的影响较小,应该侧重考虑其出光后的指向偏差。由此得出,各波段波前畸变均小于系统要求 RMS 小于 8,满足系统设计要求。

表 2 各波段激光的波前畸变数据

Tab. 2 Wavefront distortion of different wavelength laser

$t/s$	各波段激光波前畸变		
	长波激光	中波激光	短波激光
15	0.839	0.082	0.043
30	1.048	0.103	0.054
45	1.123	0.135	0.062
60	1.168	0.162	0.072
75	1.205	0.194	0.080
90	1.238	0.211	0.086

计算了面型畸变以及折射率畸变产生的光程差对波前畸变的影响,从中发现在 90 s 时合束镜 2 的面型畸变光程差  $\text{RMS} = 0.485 \mu\text{m}$ ,折射率畸变产生的光程差  $\text{RMS} = 0.128 \mu\text{m}$ 。可以看出,径向温度梯度带来的面型畸变占据了主要畸变因素,符合前文热分析的结果,即径向温差随时间逐渐增大,轴向温差在 35 s 基本达到平衡。所以对于该系统来说,设计温控的主要方向是降低各块合束镜的径向温差。

### 5.2 激光偏置对波前畸变的影响

激光的偏置易造成局部热效应明显,使经过该系统的光束波前畸变存在高频成分从而进一步导致光束质量的下降,所以在系统设计时应对这种高功率偏置激光的热效应给出定性分析。为此,计算了激光偏置对通过合束镜 2 的长波激光波前畸变的影响。工况 1 为短波激光偏置长波激光中心 35 mm;工况 2 为短波激光辐照位置与长波激光同心,工况示意如图 8 所示。

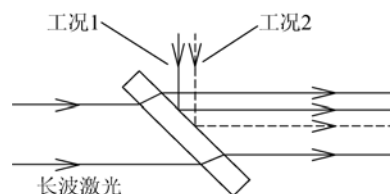


图 8 两种工况

Fig. 8 Two load cases

图 9 显示了长波激光经过该合束镜后的波前畸变图。可以看出,短波激光的偏置对光束的波前畸变产生了影响。

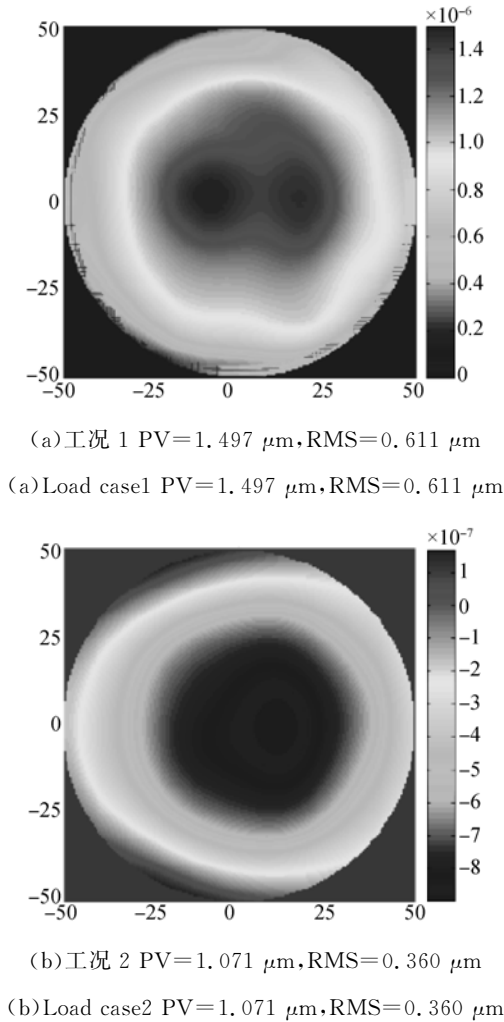


图 9 两种工况的波前畸变

Fig. 9 Wavefront distortions of two load cases

由图 9 可以得出以下结论:(1)短波激光偏置放置使长波激光的波前畸变出现 2 个极大值,产生部分高频畸变;(2)短波激光偏置造成波前畸变量增大,其 PV 值增加 39.7%,RMS 值增加 69.7%。激光偏置对经过透镜光束的波前产生的影响由激光输出功率、光斑形状以及作用时间等因素共同影响,通过分析合束系统的波前畸变,认为短波激光所造成的高频成分对激光波前造成一定影响。但是各波段波前畸变均满足系统要求,

高频成分对光束波前的影响较小,故在进行波前校正时需加以重点关注。

### 6 实验设计

#### 6.1 实验平台搭建

长波高功率激光器出射激光功率大,设备震动大,对于干涉仪电磁辐射现象明显,很难利用干涉仪对其进行测试。所以,对于高功率激光辐照热效应研究通常采取低功率激光器进行模拟用以验证光机热数值分析的准确性。实验采用系统中功率为 400 W 的 0.808  $\mu\text{m}$  可见光波段激光作为实验光源,搭建实验平台,对合束镜 2 样镜进行辐照实验。实验中,镜片的夹持方式如图 6 所述,图 10 为实验平台以及镜片的夹持实物图。

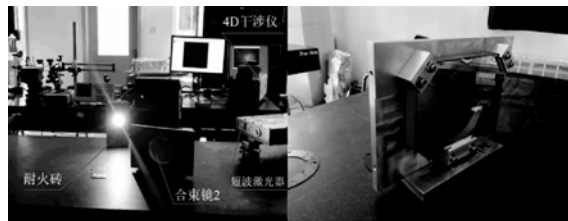
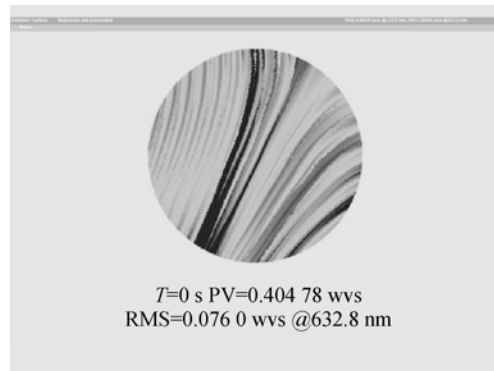


图 10 实验平台

Fig. 10 Experiment testbed

实验分别采集初始 0 s 时干涉图像,激光辐照 30 s、60 s 以及 90 s 时刻的干涉图像,并根据结果与该条件下仿真分析结果进行对比。图 11 为 T=0 s 时和 T=90 s 时采集到的干涉图像。



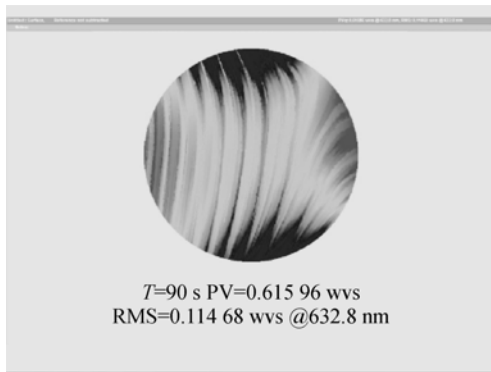


图 11 初始干涉图像与 90 s 时干涉图像

Fig. 11 Fringe patterns at initial state and 90 s

## 6.2 仿真数据与实验数据对比

首先,利用功率计测试得到合束镜 2 样镜镀高反膜一侧对短波激光吸收率为 0.6%。通过仿真分析方法进行计算,得到热效应造成的波前畸变。合束镜本身由于加工以及装调等原因会有残存的初始波像差,利用实验检测数据减去初始残余波像差即为热效应造成的激光波前畸变。表 3 显示了仿真分析得到的 PV 值和 RMS 值与实验采集的数据。

表 3 仿真数据与实验数据

Tab. 3 Simulation data and experimental data (nm)

t/s	仿真数据			实验数据		
	PV	RMS	PV	PV	RMS	PV
0	0	0	256.14	0	48.09	0
30	59.21	10.11	310.35	54.21	57.49	9.4
60	107.86	18.86	352.94	96.8	65.82	17.73
90	151.61	26.88	389.43	133.29	73.40	25.31

除去初始波像差,对热效应带来的波前畸变的实验数据(和)以及仿真数据(PV 和 RMS)进行拟合如图 12 所示。

结果表明,在 90 s 时间内,RMS 值符合程度良好,误差为 6.2%,PV 值误差为 13.7%。PV 值是由面型畸变中相对于原面型位移峰谷值决定,极易受到随机误差干扰如灰尘、表面瑕疵等,所以其误差相对较大<sup>[15]</sup>。

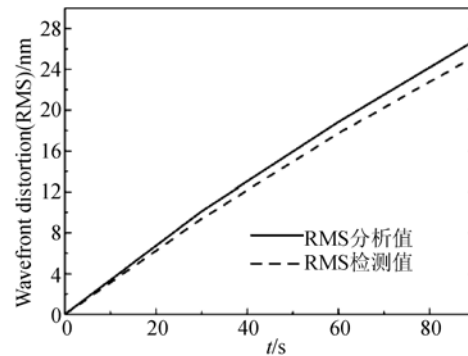
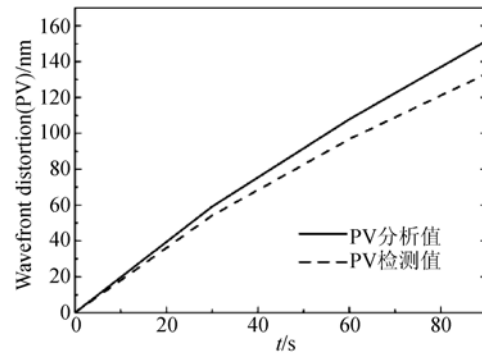


图 12 仿真结果与实验结果对比

Fig. 12 Comparison of simulation results and experimental results

## 6.3 实验结论

使用短波激光对合束镜进行了辐照实验,并与仿真结果进行对比,该光机热一体化分析方法仿真边界条件设置准确,计算结果可信。可将分析方法推广到多镜组的透射及反射系统中。

## 7 结 论

本文介绍了利用镀膜法进行高功率激光非相干合束的新方法。针对该系统中关键元件红外材料 ZnSe 易受热效应影响的情况,利用热光学理论以及自编程序在设计时对合束系统中热效应对各路激光波前造成的影响进行分析,并对经过仿真计算后的单块合束镜进行了激光辐照变形实验,实验证明了分析的准确性和合理性。结果表明:对于该系统,高功率激光热效应对合束系统各光路波前畸变造成的影响均满足各波段激光波前畸变量 RMS 小于  $\lambda/8$  (长波激光波前畸变最大 RMS=1.238  $\mu\text{m}$ ; 中波激光为 RMS=0.211  $\mu\text{m}$ ;

短波激光为  $RMS=0.086\ \mu m$ );激光偏置造成波前畸变存在高频成分以及带来波前畸变量的增大,其中 PV 值增加 39.7%,RMS 值增加 69.7%,

但对该系统而言高频成分引起的热畸变可以忽略;该系统中面型畸变是造成系统波前畸变的主要因素,温控设计主要目的应为控制镜面径向温差。

### 参考文献:

- [1] 张强,汪岳峰,雷呈强,等. 双光路合成系统光束耦合精度研究 [J]. 红外与激光工程,2010,39(6):1055-1059.  
ZHANG Q, WANG Y F, LEI CH Q, *et al.*. Research on beam coupling precision of double beams combination system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010,39(6):1055-1059. (in Chinese)
- [2] 邵帅. 多波段共口径红外系统光机热一体化设计 [J]. 仪器仪表学报,2013,34(2):388-391.  
SHAO SH. Integrated design of optical-mechanism and heat shared aperture infrared system with multi-spectrum band [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013,34(2):388-391. (in Chinese)
- [3] 么艳平,刘景和. ZnSe 红外窗口材料的性能及其制备 [J]. 人工晶体学报,2006,35(1):183-187.  
YAO Y P, LIU J H. Property and Fabrication of ZnSe Infrared window material [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2006,35(1):183-187. (in Chinese)
- [4] 巩盾,田铁印,王红. 离轴三反射系统的热光学分析和温控指标的制定 [J]. 光学精密工程,2011,19(6):1213-1219.  
GONG D, TIAN T Y, WANG H. Thermal optical analysis of off-axis three-mirror system and its thermal control requirements [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(6):1213-1219. (in Chinese)
- [5] 贾勇,高云国,邵帅. 热载荷下激光扩束系统的光机优化设计 [J]. 中国激光,2014,41(1):01160031-01160034.  
JIA Y, GAO Y G, SHAO SH. Opto-mechanical optimization for laser expander system under thermal loads [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014,41(1):01160031-01160034. (in Chinese)
- [6] 汤伟,郭劲,邵俊峰,等. 激光重频对脉冲非稳腔 TEA CO<sub>2</sub> 激光远场传输特性的影响分析 [J]. 红外与激光工程,2013,42(9):2381-2383.  
TNAG W, GUO J, SHAO J F, *et al.*. Analysis of far-field characteristics with repetition frequency of TEA CO<sub>2</sub> laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013,42(9):2381-2383. (in Chinese)
- [7] 孙峰,程祖海,张耀宁,等. 在波长 1.315 下几种激光器窗口热效应比较研究 [J]. 中国激光,2004,31(4):412-416.  
SUN F, CHENG Z H, ZHANG Y N, *et al.*. Thermal distortions in calcium fluoride, potassium chloride and fused silica Windows at 1.315 [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004,31(4):412-416. (in Chinese)
- [8] 吕可. 高能激光内通道传输仿真模型研究[D]. 长沙:国防科学技术大学研究生院,2012.  
LV K. *Simulation Model of High Power Laser Propagation in the Inner Channel* [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology,2012
- [9] 冯树龙. 地基望远镜力学、温度场特性对光学性能影响研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2005.  
FENG S L. *A Study on Optical Performance with Mechanical, Thermal Properties of THE based on ground Telescope* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2005. (in Chinese)
- [10] 柳建,李树民,赵杰,等. 镜面热变形及吹气流场对光束的联合影响 [J]. 光学精密工程,2014,22(8):2032-2037.  
LIU J, LI SH M, ZHAO J, *et al.*. Combined influence of mirror thermal deformation and blowing on beam propagation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(8):2032-2037. (in Chinese)
- [11] 杨佳文,黄巧林,韩友民. Zernike 多项式在拟合光学表面面型中的应用与仿真 [J]. 航天返回与遥感,2010,31(5):49-55.  
YANG J W, HUANG Q L, HAN Y M. Application and simulation in fitting optical surface with zernike polynomial [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010,31(5):49-55. (in Chinese)
- [13] 解滨,肖志宏,余景池. 利用 Zernike 多项式分析超薄镜热变形 [J]. 光学精密工程,2007,15(2):174-178.  
XIE B, XIAO ZH H, YU J CH. Analyzing thermal deformation of ultra thin mirror using Zernike

- polynomials [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (2):174-178. (in Chinese)
- [14] 赵立新. 空间太阳望远镜的热设计和热光学分析 [J]. *航天返回与遥感*, 2002, 23(1):7-11.  
ZHAO L X. Thermal design and thermal-optical analysis of space space solar telescope [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, 23(1):7-11. (in Chinese)
- [15] JASON D S. *Numerical Simulation of Optical Wave Propagation* [M]. Washington: SPIE Press, 2010.
- [16] 于新峰, 巩岩, 倪明阳, 等. 基于运动学支撑的透镜光学表面面型及其复现性 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8):2000-2006.  
YU X F, GONG Y, MI Y M, *et al.*. Optical surface figure of lens under kinematic mount apparatus and its reproducibility [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8):2000-2006. (in Chinese)

#### 作者简介:



孙毅(1987—),男,吉林长春人,博士研究生,2010年于吉林大学获得学士学位,主要从事光学精密机械结构及激光热效应研究。E-mail: sunyi1987@163.com

#### 导师简介:



高云国(1955—),男,山东乳山人,研究员,博士生导师,1982年于哈尔滨科技大学获得学士学位,1991年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电仪器总体设计的研究。E-mail: gaoyg\_gjs@163.com.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)