

激光重频对脉冲非稳腔 TEA CO₂ 激光远场传输特性的影响分析

汤 伟^{1,2}, 郭 劲¹, 邵俊峰^{1,2}, 郭汝海¹, 王挺峰¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了研究 TEA CO₂ 激光重复频率对远场光束特性的影响, 首先采用有限元方法计算了不同重复频率下反射镜的温度场和热变形分布, 然后采用协方差矩阵法对镜面热变形进行了 Zernike 拟合, 最后结合衍射的角谱传播理论和功率谱反演法分析了不同重频 TEA CO₂ 激光经过内光路热畸变作用后的远场光束特性。研究表明: 在净吸收能量相同的情况下, 随着重复频率的增大, 反射镜的温度逐渐升高, 热变形量逐渐增大, 经过内光路热畸变作用后, 远场光束的 S_r 和平均能量密度 E_d 逐渐减小, β 参数逐渐增大, 光束质量逐渐变差; 对于 TEA CO₂ 激光, 重频为 300 Hz 的 E_d 值仅为 10 Hz 的 40%, 远场光束的峰值光强下降了 43%, 光斑展宽了近 60%。文中的研究结果为 TEA CO₂ 激光发射系统的优化设计提供可靠的依据。

关键词: 重复频率; TEA CO₂ 激光器; 热畸变; 光束质量

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2380-06

Analysis of far-field characteristics with repetition frequency of TEA CO₂ laser

Tang Wei^{1,2}, Guo Jin¹, Shao Junfeng^{1,2}, Guo Ruhai¹, Wang Tingfeng¹

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study the influence of TEA CO₂ laser repetition frequency on far-field beam quality, the temperature field and thermal deformation distribution of the mirror were calculated firstly by the finite element analysis of thermodynamics instantaneous method with TEA CO₂ laser irradiation of different repetition frequencies. Then, mirror thermal distortion was fitted by Zernike polynomials. Finally, far-field characteristics of different repetition frequencies TEA CO₂ laser were obtained by the angular spectrum propagation theory of diffraction. The theory and simulation results show that with the increasing of laser repetition frequency, the mirror temperature and thermal deformation are gradually increasing. After thermal deformation effect, S_r and the average energy density E_d decrease, and β parameter gradually increases in the far field. Comparing with 10 Hz, E_d of 300 Hz decreases 40%, peak power in the far field decreases 43% and beam waist broadens 60%. When the laser repetition frequency

收稿日期: 2013-01-14; 修订日期: 2013-02-19

基金项目: 国家重点实验室自主基础研究课题(SKLLIM1004-01)

作者简介: 汤伟(1985-), 男, 博士生, 主要从事高能激光热畸变仿真与分析方面的研究。Email: twei222@163.com

导师简介: 郭劲(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: Guojin_1964@126.com

is greater than 100 Hz, due to the appearance of peaks and valleys on the mirror, the far-field beam quality decreases significantly. The results of this paper can provide the reference to TEA CO₂ laser launch system.

Key words: repetition frequency; TEA CO₂ laser; thermal aberration; beam quality

0 引言

横向激励大气压(Transversely Excited Atmospheric, TEA) CO₂ 激光器由于具有峰值功率高、短拖尾、可高重复频率运转等优点,可应用于激光雷达、激光对抗以及激光推进等研究领域^[1-3];然而由于 TEA CO₂ 激光功率密度大、重复频率高,使得光束在传输过程中,必然受到内光路中反射镜热畸变的作用以及大气传输的影响,从而影响远场的光束质量。

目前,有关连续激光辐照下内光路反射镜热畸变的研究已有报道^[4],但是由于高重复频率下的脉冲激光与连续激光的热积累过程不同^[5],从而导致反射镜的热变形也会发生改变。此外,对于脉冲激光的研究重点目前主要集中在如何提高重复频率上,而忽略了重复频率的提高对光束质量的影响,实际上高重复激光经过内光路热畸变作用后对光束质量有较大的影响,因此研究不同重频 TEA CO₂ 激光对反射镜热畸变的影响具有一定的实际意义。

文中首先通过有限元瞬态热-结构耦合的方法建立了反射镜的热分析模型,在净吸收能量相同的情况下,仿真得到了不同重频 TEA CO₂ 激光辐照下镜面的热变形分布,并分析了 TEA CO₂ 激光重频的热积累规律。然后采用大气湍流相位屏功率谱反演法和衍射的角谱理论计算了不同重复频率的 TEA CO₂ 激光在大气湍流作用下传输至远场的光强分布,并采用典型的远场光束质量评价因子^[6]、 β 参数、Strehl 比以及平均能量密度 E_d 来评价大功率 TEA CO₂ 重复频率对远场传输特性的影响。

1 理论基础

强激光辐照下,由于存在热吸收,反射镜不可避免地会产生温升。对于各向同性均质材料,其温度场分布可以采用无体热源项的热传导微分方程^[7]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 为镜体在 t 时刻的温度值; k 为材料的导热系数; ρ 为密度; c 为比热容。考虑到反射镜受激光辐照时,镜体表面不仅有热流进入,而且还存在对流换热,因此其边界条件如下式所示:

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

式中: T_c 为环境温度; T_s 为反射镜表面温度; h_c 为对流换热系数; ε 为反射镜反射率; I 为辐照光源的光强; S 为激光辐照面积; Σ 为激光辐照区域; Σ_1 为热对流加载区域。由方程(1)和方程(2)联立可得反射镜的温度场分布,然而实际上由于三维模型结构较为复杂,很难通过解析的方法得到精确解,因此,目前常采用数值模拟的方法进行求解。

强激光辐照下,反射镜辐照区域温度较高,镜体内部会形成一个温度梯度分布,从而产生热应力,导致镜面发生热变形。对于圆形反射镜而言,其热变形量可由柱坐标下热弹方程^[8]来描述。

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

式中: u_r 和 u_z 分别表示反射镜沿径向和轴向的热变形量; e 为反射镜的热应变; α_t 为基底材料的热膨胀系数; ν 为泊松比; T 为反射镜的温度场分布函数。

目前,求解方程(1)和方程(3)比较常用的数值方法主要包括有限差分法和有限元法。由于结构力学分析中广泛采用有限元法计算热应力,与之相应的热分析中使用有限元法有利于二者之间的结合,因此文中在计算热变形时,使用有限元法。

激光束经过带有热变形的反射镜后会引入一个附加相位,从而改变光束的波前分布,影响远场光束质量。这个附加相位主要与镜面的轴向热变形量和入射角有关,则反射镜产生的附加相位可表述为:

$$\varphi(x, y) = 2k \times \cos \theta \times u_z(x, y) \quad (4)$$

式中: $u_z(x, y)$ 为反射镜的镜面热变形量; k 为波数; θ

为激光倾斜入射角;然而,利用有限元的方法得到镜面热变形量 $u_z(x, y)$ 仅为一些均匀分布的离散点,易造成位移信息的缺失,因此要对有限元分析得到的离散变形量进行曲面拟合,以便于光学计算。

Zernike 多项式由于具有互为正交,线性无关等特性,镜面的热变形量可由 Zernike 多项式作为基底函数进行曲面拟合。

$$u_{zi}(x_i, y_i) = q_1 Z_{i1}(x_i, y_i) + \dots + q_j Z_{ij}(x_i, y_i) + \dots + q_n Z_{in}(x_i, y_i) = \mathbf{q}^T \mathbf{Z}_i \quad (5)$$

式中: \mathbf{Z}_i 为第 i 个采样点 Zernike 多项式前 n 项向量; \mathbf{q} 为系数向量。协方差矩阵法是 Zernike 多项式镜面拟合常用算法之一^[9]。

定义 $\mathbf{u}_{mi} = \mathbf{u}_{zi} - \bar{\mathbf{u}}_z$, $\mathbf{U}_{ij} = \mathbf{Z}_{ij} - \bar{\mathbf{Z}}_j$, 其中 $\bar{\mathbf{u}} = 1/N_i \sum_{i=1}^N \mathbf{u}_{zi}$, $\bar{\mathbf{Z}}_j = 1/N_i \sum_{i=1}^N \mathbf{Z}_{ji}$; $j=1, 2, \dots, n$; $i=1, 2, \dots, N$; N 为有限元分析时得到数据点的个数,则由协方差矩阵法可得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} & \dots & \mathbf{A}_{1n} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} & \dots & \mathbf{A}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \mathbf{A}_{ij} & \vdots \\ \mathbf{A}_{n1} & \mathbf{A}_{n2} & \dots & \mathbf{A}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{q}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{1m} \\ \mathbf{A}_{2m} \\ \vdots \\ \mathbf{A}_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: \mathbf{A}_{ij} 表示 \mathbf{Z}_i 和 \mathbf{Z}_j 的协方差。可由下式表示:

$$\mathbf{A}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_k \mathbf{Z}_{ki} \mathbf{Z}_{kj} - \bar{\mathbf{Z}}_i \bar{\mathbf{Z}}_j \quad (7)$$

$$\mathbf{A}_{im} = \frac{1}{N} \sum_k \mathbf{U}_{ik} \mathbf{u}_{mk} \quad (8)$$

将公式(7)和公式(8)代入公式(6)可得 Zernike 多项式前 n 项系数 \mathbf{q} , 从而获得将已知离散数据点上热变形量用多项式的线性组合表示的镜面热变形函数 $u_z(x, y)$ 。

由镜面热变形函数 $u_z(x, y)$ 以及衍射的角谱传播理论可得激光经过反射镜热畸变作用后远场的光强分布公式:

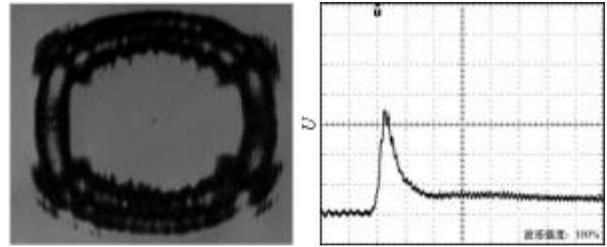
$$I_F = [|\text{IFFT}\{\text{FFT}\{U_n \exp(-2jk \cos \theta u_z(x, y))\} \cdot \{\exp(jkl \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2})\}^2}|]^2 \quad (9)$$

式中: U_n 激光入射前的场分布; l 为远场传输距离; f_x, f_y 为对应的频域坐标; λ 为激光波长。

2 热畸变仿真分析

分析时大功率 TEA CO₂ 激光器为非稳腔结构,输出光束近似为环形分布^[10],单脉冲能量为 30 J,脉宽为 100 ns,波长 λ 为 10.6 μm ,内环半径 w_0 为 0.022 m,

外环半径 w 为 0.04 m,光斑形状以及脉冲波形如图 1 所示。



(a) 近场光束烧斑图 (b) 脉冲波形
(a) Picture of burned spots (b) Pulse waveform

图 1 光源参数

Fig.1 Laser parameters

反射镜为多边形铜镜(无氧铜),结构如图 2 所示,厚度 h 为 15 mm,表面温度 T_s 为 25 $^\circ\text{C}$,环境温度 T_c 为 25 $^\circ\text{C}$,对流换热系数 h_c 为 60 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,三点夹持方式,热吸收率为 0.03。忽略温度对材料物理特性的影响,无氧铜的主要参数如表 1 所示。

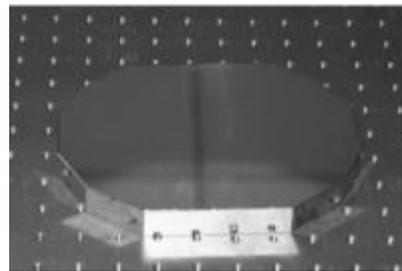


图 2 反射镜实物图

Fig.2 Physical model of mirror

表 1 铜镜的主要参数

Tab.1 Main parameters of copper

Parameter	Value
Density/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	8 933
Heat exchange coefficient/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	384.8
Line expand coefficient/ $^\circ\text{C}^{-1}$	14.6×10^{-6}
Poisson's ratio	0.32
Elastic module/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	1.298×10^{11}
Specific heat/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	386.4

2.1 重频对反射镜的温度场影响

分析时重频分别取 10 Hz、50 Hz、100 Hz、200 Hz 以及 300 Hz。采用有限元分析软件 Ansys(Mechanical

APDL)进行单块反射镜的温度场及热变形分析。当倾斜入射角为 45°时,不同重频下反射镜最大温升值随脉冲个数的关系如图 3 所示。

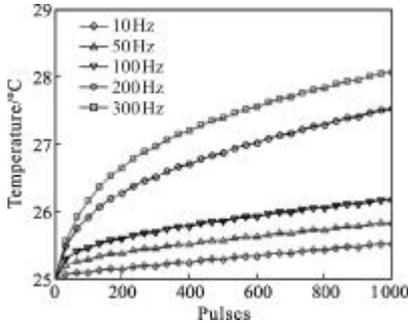


图 3 反射镜最大温升值随脉冲个数的变化关系

Fig.3 Maximum temperature with the relationship of pulses

由图可以看出,在反射镜净吸收能量相同(脉冲个数相同)的情况下,激光器重复频率的越大,镜面的温度值越高;不同重复频率下,随着脉冲个数的增加,镜面温度值升高,逐渐达到热平衡,且激光器的重复频率越大,达到热平衡所需的脉冲数越多,1 000 个脉冲后,均已达到了热平衡。

分析认为重频越高,镜面的温升值越大的主要原因是由于不同重频下,反射镜的热积累程度不同。为了说明热积累的变化过程,给出了 0.1 s 内镜面最高温度值随时间的变化过程,如图 4 所示。

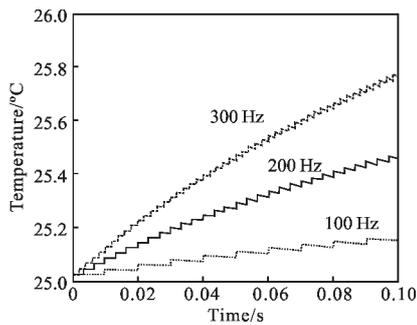


图 4 不同重频下最高温度值与时间的关系曲线

Fig.4 Relationship between the maximum temperature and time with different repetition frequencies

由图 4 可以看出,脉冲激光作用下,反射镜存在升温 and 降温两个过程,反射镜的温度呈锯齿状逐渐升高。记单脉冲作用后反射镜的最高温度值 T_H ,在脉冲间隔结束,下一个脉冲作用前的最高温度值为 T_L , T_H 与 T_L 之差可以有助于分析热积累过程, T_H 与 T_L 之间相差越小,说明热积累效应越显著。如图 5 所

示,随着激光器重频增大, T_H 与 T_L 的差值减小,说明 TEA CO₂ 激光器随着重频的增大,热积累效应越显著,镜面温度值越大。

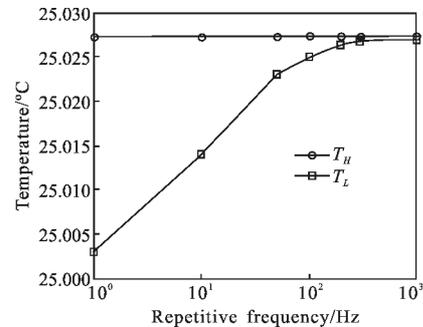
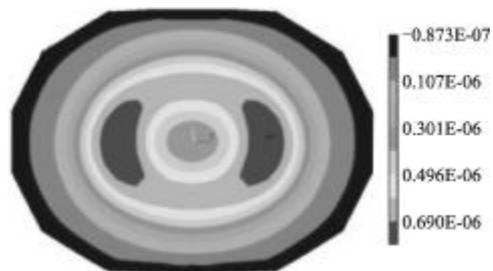


图 5 热积累与重频的关系曲线

Fig.5 Relationship between heat accumulation and repetition frequency

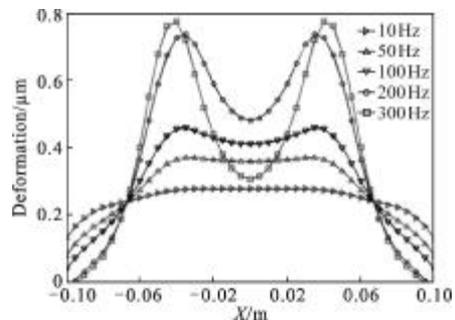
2.2 不同重频下反射镜的热变形分布

基于反射镜温度场的热分析结果,应用 ANSYS 热-结构耦合的瞬态分析方法,可以得到不同重频下反射镜的热变形分布(1 000 个脉冲),如图 6 所示。



(a) 重频为 300 Hz 时,反射镜热变形云图

(a) Thermal deformation nephogram with 300 Hz



(b) 不同重频下反射镜热变形的径向分布

(b) Thermal deformation of the radial distribution with different repetition frequencies

图 6 热变形仿真结果

Fig.6 Thermal deformation simulation results

由图 6(a)可以看出,反射镜在强激光辐照下镜面发生热变形,热变形呈环形椭圆分布,最大热变形位于水平方向的 x 轴上,这主要是由于激光倾斜入射,导致反射镜上光照区为环形椭圆形分布所致。图 6(b)给出了不同重频下反射镜沿 x 轴的热变形分布,从图中可以发现,尽管反射镜的净吸收热量相同,但由于不同重频下反射镜的热积累效应不同,从而导致镜面的热变形分布不同;主要的规律是随着激光重复频率的增加,反射镜的热变形量逐渐增大,重频为 300 Hz 时,最大热变形量为 $0.787 \mu\text{m}$,近似为 10 Hz 时热变形量的 3 倍。此外,从图 6(b)中还可以发现,激光器重频小于 100 Hz 时,镜面形状较好,光照区热变形量较为平滑,然而当重频大于 100 Hz 时,在激光光照区出现波峰波谷,镜面形状明显变差。这主要是由于激光器重复频率较大时,镜体的热传导和热扩散时间较短,温升主要集中在光照区,从而导致镜面存在较大的温度差,进而使得重频大时,镜面热变形分布出现波峰波谷;当重频较小时,热扩散充分,温度分布均匀,从而使得镜面热变形分布较为平滑。

3 远场光束质量分析

已经通过有限元的方法求得大功率 TEA CO_2 激光器在不同重复频率下,反射镜热变形的变化规律。下一步更加关心热畸变作用下 TEA CO_2 激光的远场光束特性。

激光在传输过程中,会受到多种扰动源的影响,导致光束波前发生畸变,从而影响传输效率,而大气湍流就是主要的扰动源之一。文中采用满足 Kolmogonov 谱统计规律的多相位屏法^[11]来模拟大气湍流的传输特性,分析时取内光路系统反射镜的块数为 10,远场传输距离为 5 km,大气湍流外尺度 L_0 取 10 m,内尺度 l_0 取 1 mm,湍流强度 C_n^2 为 1×10^{-14} ,相位屏宽度 G 为 6 m,采样点数为 512×512 ,大气透过率为 0.9,相位屏长度 Δz 为 50 m,传输距离 l 为 4 km。基于镜面热变形的仿真结果以及公式(6),可得热畸变和湍流作用下重频为 300 Hz 的 TEA CO_2 激光远场光强分布,如图 7 所示。

由图 7(a)可以看出,均匀分布的环形光束在衍射极限条件下传输至远场,光斑形状发生改变,能量

聚焦于光斑中心;经过内光路热畸变作用后,尽管峰值光强仍位于光斑中心,但由于出现多个衍射环,导致远场光束峰值光强下降,光斑发生展宽,如图 7(b)所示;热畸变光束经过湍流作用后,湍流效应显著,远场光斑被撕裂,光强出现多个极大值点,峰值光强进一步降低。

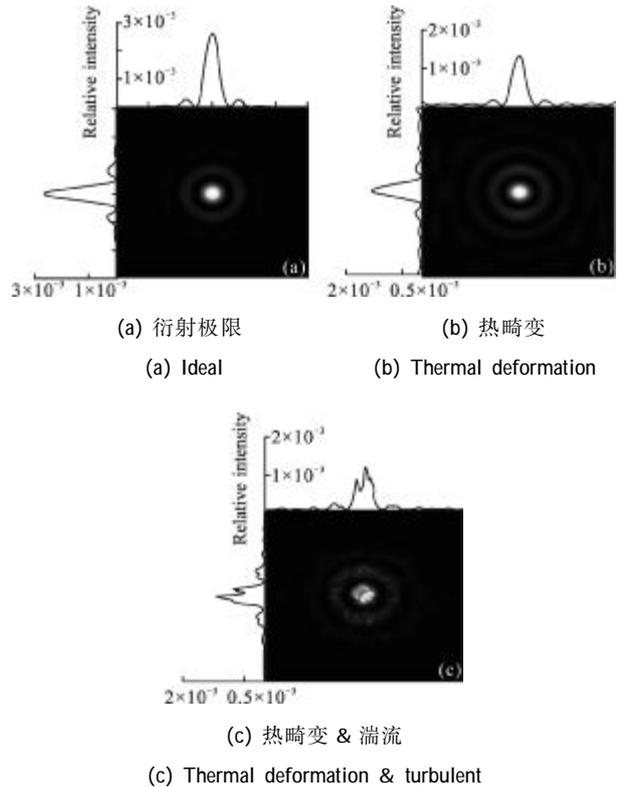


图 7 重频为 300 Hz 的 TEA CO_2 激光远场光强分布
Fig.7 Far-field intensity distribution of TEA CO_2 laser with 300 Hz

为了分析不同重频对远场光束质量的影响,文中采用 β 参数、Strehl 比(S_r)^[7]以及远场平均能量密度 E_d 来评价远场光束质量。经过内光路热畸变和大气作用后,不同重频下,远场光束质量参数如表 2 所示。

表 2 远场光束参数

Tab.2 Far-field beam quality parameter

Repetition frequency	10 Hz	50 Hz	100 Hz	200 Hz	300 Hz
S_r	0.946	0.872	0.813	0.570	0.539
β	1.111	1.311	1.372	1.672	1.772
$E_d/\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.326	0.233	0.213	0.143	0.128

从表 2 中数据可以看出,随着 TEA CO_2 激光器重频的增加,远场光束的 β 参数逐渐增大,而 S_r 逐渐减小,说明激光器的重频越大,热畸变效应越显

著,导致远场光束峰值光强下降,光斑展宽。重频为 300 Hz 与 10 Hz 相比,远场光束峰值光强下降了 43%,光斑展宽了 60%。此外还可以看出,对于 TEA CO₂ 激光器,当重复频率大于 100 Hz 时,远场光束质量显著下降;分析认为这主要是由于当 TEA CO₂ 激光器重频大于 100 Hz 时,由于反射镜的热积累效应显著,镜面在光照区出现波峰波谷,改变了激光入射角,从而导致光束经过反射镜后光束展宽、峰值光强下降。

对于激光对抗而言,激光远场平均能量密度一直是评价其远场光束质量的重要参数,理想情况下,不同重频的远场平均能量密度应该相等,然而由于内光路热畸变的作用,导致远场平均能量密度 E_d 随着激光器重复频率的增加而减小,如表 2 所示,对于 TEA CO₂ 激光重频为 300 Hz 的 E_d 值仅为 10 Hz 的 40%,可见,内光路热畸变大大降低了高重频激光的远场平均能量密度。

4 结 论

文中以重复频率为 10 Hz、50 Hz、100 Hz、200 Hz、300 Hz 的 TEA CO₂ 激光为例,针对重复频率对反射镜热畸变以及远场光束特性的影响进行了仿真分析。研究表明:激光器的重复频率对反射镜的温升和热变形分布有一定的影响,激光器重频越高,反射镜的温升和热变形越大;对于 TEA CO₂ 激光,在净吸收能量相同的情况下,重频为 300 Hz 的热变形量近似为 10 Hz 的 3 倍。经过内光路热畸变作用后,随着重频的增加,远场光束的峰值光强逐渐下降,光斑展宽,平均能量密度逐渐减小,光束质量逐渐变差。重频大于 100 Hz 时,由于反射镜的面形较差,远场光束的 S_r 比、 β 参数和平均能量密度 E_d 显著下降。

因此,对于大功率重频 TEA CO₂ 激光器,在应用中,需要针对不同重频的内光路热畸变问题进行有效地抑制。文中的研究将对 TEA CO₂ 激光发射系统的设计提供一定的理论依据。

参考文献:

- [1] Baranov V Y. High repetition rate pulsed gas lasers and their applications in chemistry and isotope separation [J]. IEEE, 1983, 19(10): 1577-158.
- [2] Karapuzikov A I, Malov A N, Sherstov I V. Tunable TEA CO₂ laser for long-range DIAL lidar [J]. Infrared Phys & Tech, 2000, 41(2): 77-85.
- [3] Hasson V. Review of design concepts and diagnostics for 100 kW class repetitive pulsed CO₂ laser [C]//SPIE, 2003, 5120: 717-730.
- [4] Liu Wenguang, Rao Peng, Hua Weihong. Effects of thermal distortion of Si mirror irradiated by non-uniformity laser intensity on laser propagation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(10): 1615-1618. (in Chinese)
刘文广, 饶鹏, 华卫红. 非均匀激光辐照下硅镜热变形对光束传输特性的影响 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(10): 1615-1618.
- [5] Li long, Nie Jianping, Dong Wuwei, et al. Time-varying temperature filed of Nd:YAG rod end-pumped by pulsed LD [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9): 1657-1661. (in Chinese)
李隆, 聂建萍, 董武威, 等. 脉冲激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 棒时变温度场 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1657-1661.
- [6] Peng Yufeng, Han Junpeng, Zhang Yi, et al. Influence of the thermal distortion of resonator mirrors on propagation properties of laser beams through atmosphere [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2442-2446. (in Chinese)
彭玉峰, 韩俊鹏, 张毅, 等. 腔镜热畸变对激光在大气中传输特性的影响 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2442-2446.
- [7] Hello P, Vinet J Y. Analytical models of thermal aberrations in massive mirrors [J]. J Phys, 1990, 1267-1282.
- [8] Qi Wenzong, Huang Wei, Zhang Bin, et al. Finite element analysis of thermal distortion of infrared CW laser reflectors [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(8): 953-956. (in Chinese)
齐文宗, 黄伟, 张彬, 等. 红外连续激光反射镜热畸变的有限元分析 [J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(8): 953-956.
- [9] Liu Yue'ai. A simple method for Zernike polynomial fitting in fringe analysis [J]. Acta Optica Sinica, 1985, 5(4): 368-373. (in Chinese)
刘月爱. 条纹分析中一种简单的 Zernike 多项式拟合方法 [J]. 光学学报, 1985, 5(4): 368-373.
- [10] Yang Guilong, Shao Chunlei, Guo Ruhai, et al. Experimental study of unstable resonator for high-power TEA CO₂ laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(10): 2478-2482. (in Chinese)
杨贵龙, 邵春雷, 郭汝海, 等. 高功率 TEA CO₂ 激光器非稳腔实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(10): 2478-2482.
- [11] Dennis L. Multiple phase-screen calculation of the temporal behavior of stochastic waves [J]. IEEE, 1983, 71(6): 722-737.