

大功率 CO₂ 激光器输出窗口热性能分析

张 阔^{1,2}, 陈 飞^{1,2}, 李若斓³, 杨贵龙^{1,2}

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光电对抗技术创新研究室, 吉林 长春 130033;
2. 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
3. 内蒙古化工职业学院 机电系, 内蒙古 呼和浩特 010070)

摘 要: 为了研究大功率 CO₂ 激光发射过程中输出窗口吸收激光能量产生热性能变化的问题, 建立了输出窗口传热学和结构力学耦合非稳态模型, 通过对模型进行有限元分析得到表征输出窗口变化的温度、热变形和热应力等参数分布。首先, 针对大功率 CO₂ 激光特点, 讨论了输出窗口材料 GaAs 和 ZnSe 的物理特性。然后, 基于 10 kW 级大功率 CO₂ 激光器光学谐振腔结构和输出窗口材料物理特性, 建立了输出窗口传热学和结构力学的有限元模型。最后, 利用 COMSOL 软件对该模型进行求解, 得到以 GaAs 和 ZnSe 为材料的输出窗口的温度、热变形和热应力等参数分布, 并对比分析不同窗口材料对参数的影响。研究表明: 在 10 kW 级激光作用下, ZnSe 窗口温升小于 GaAs 窗口; 两种输出窗口产生 μm 量级热变形; 由于 GaAs 材料的热导率高, GaAs 窗口的热变形和热应力分布更为均匀。

关键词: 大功率 CO₂ 激光; 输出窗口; 温度; 热变形; 热应力

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0205005

Analysis on thermal performance of output window in high power CO₂ laser

Zhang Kuo^{1,2}, Chen Fei^{1,2}, Li Ruolan³, Yang Guilong^{1,2}

- (1. Innovation Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Technology, Changchun Institute of Optic, Fine Mechanic and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun 130033, China;
3. Mechanical and Electrical Department, Inner Mongolia Vocational College of Chemical Engineering, Huhhot 010070, China)

Abstract: In order to study the thermal characteristic of output window during the working process of high power CO₂ laser, a time-dependent model coupled with heat transfer and structure mechanic was established to calculate the distribution of temperature, thermal deformation and thermal stress. First, the physics characteristic of output window materials was discussed. Then, based on the resonant cavity structure of 10 kW TEA CO₂ laser and the physics characteristic of output windows, a heat transfer and structure mechanic model was established. Finally, COMSOL finite element software was used to calculate the distribution of temperature, thermal deformation and thermal stress. The influence of different materials of output window on parameters was analyzed. The results indicate that the temperature

收稿日期: 2016-06-05; 修订日期: 2016-07-07

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室自主研究课题(SKLLIM1413)

作者简介: 张阔(1984-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事高功率激光器方面的研究。Email: zhangkuo1104@163.com

rise of ZnSe output window is less than the GaAs output window when the output power is consistent for both materials; the deformation of output windows is in the range of μm dimension under the 10 kW laser power condition; the distribution of thermal deformation and thermal stress is more even in GaAs output window for its high heat transfer coefficient.

Key words: high power CO₂ laser; output window; temperature; thermal deformation; thermal stress

0 引言

大功率 CO₂ 激光器广泛应用于工业、科研和国防等众多领域^[1-4]。CO₂ 激光波长位于 9~11 μm 波段, 激光器输出窗口需具有良好的长波红外激光透射性。由于窗口材料对激光能量的吸收效应, 输出窗口在大功率激光长时间作用下会产生变形, 窗口变形引起波前畸变, 光斑中心偏移, 影响激光光束质量和传输特性; 若变形过大则会形成输出窗口损伤, 严重影响激光器的工作效率和使用寿命。

大功率 CO₂ 激光器谐振腔由平面输出窗口与凹面反射镜构成。反射镜采用相变致冷、微通道水冷等方法可抑制热变形、改善散热效果^[5-9]。激光通过输出窗口发射, 窗口结构不能改变, 上述方法不再适用。因此, 选择热性能良好的输出窗口材料是降低窗口热变形的重要途径。通过对化学氧碘激光器输出窗口材料的研究表明在大功率激光作用下, 不同输出窗口材料的热性能差异较大^[10-12]。CO₂ 激光输出波长与氧碘激光不同, 输出窗口材料不同, 并且 CO₂ 激光器的工作时间长于氧碘激光器, 输出窗口热累积效应明显。因此, 文中针对 CO₂ 激光器常用的输出窗口材料(ZnSe 和 GaAs)在大功率激光作用下的热性能展开分析, 建立输出窗口传热学与结构力学非稳态计算模型; 利用 COMSOL 软件计算平均输出功率为 10 kW 的激光、作用时间为 60 s 过程中输出窗口的温度变化; 根据输出窗口的约束条件和温度分布计算输出窗口的热变形和热应力; 综合温度、热变形和热应力分布讨论两种材料制备的输出窗口在大功率激光作用下的性能。

1 激光输出窗口热变形数学模型

输出窗口吸收热量发生温度变化。受激光照射面积和窗口厚度等因素影响, 输出窗口基体内温度

分布不均匀。温度变化致使窗口形成热变形, 但是受限于外加约束, 输出窗口不能完全自由的变形; 同时由于输出窗口内温度场分布不均匀, 窗口各部分间因膨胀不同而相互牵制, 从而形成热应力。

激光照射输出窗口引起窗口内的温度分布可通过方程(1)计算:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \quad (1)$$

式中: ρ 为输出窗口的密度; c 为输出窗口比热容; λ 为输出窗口的热导率; $\dot{\Phi}$ 为激光照射输出窗口时窗口吸收的热量。

由于温度变化引起的热应力和热应变关系可通过方程(2)表示:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\mu}{1-2\mu} \cdot (\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z) \right) - \beta T \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\mu}{1-2\mu} \cdot (\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z) \right) - \beta T \\ \sigma_z &= \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\mu}{1-2\mu} (\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z) \right) - \beta T \\ \tau_{r\theta} &= G \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta}{r} \right) \\ \tau_{rz} &= G \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: E 为输出窗口的弹性模量; μ 为窗口材料的泊松比; 剪切模量 $G=E/(2(1+\mu))$; α 为线膨胀系数, $\beta=\alpha/(1-2\mu)$ 。方程(1)、(2)表示温度、热应力和热变形的关系。通过解析方法求解方程比较困难, 因此通过数值方法计算温度、热应力和热变形三者关系。

2 大功率 CO₂ 激光输出窗口物理模型

2.1 大功率激光器谐振腔结构及窗口材料性能

图 1 为大功率 CO₂ 激光器稳定型光学谐振腔结构, 由凹面反射镜和平面输出窗口组成。上下电极对

极间工作气体进行高压放电, 电离的气体在谐振腔内振荡形成激光输出。大功率 CO₂ 激光器反射镜采用无氧铜基体, 基体表面镀金膜提高反射镜的使用寿命。硒化锌(ZnSe)和砷化镓(GaAs)是两种常用于制备大功率 CO₂ 激光器输出窗口的材料 (两种材料物理性能列于表 1)。ZnSe 材料对红外波段激光的吸收率小, 是实验室条件下大功率 CO₂ 激光器输出窗口的首选材料; GaAs 材料的刚性好, 热导率高, 耐磨性能好, 在复杂环境下, 可代替 ZnSe 作为 CO₂ 激光器输出窗口材料^[13]。

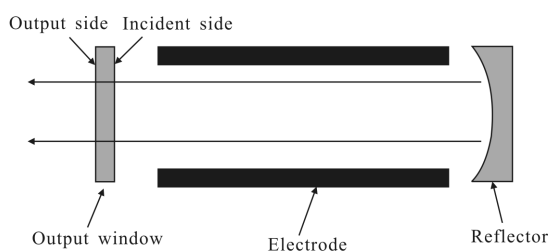


图 1 大功率 CO₂ 激光器谐振腔形式

Fig.1 Sketch map of resonator in high power CO₂ laser

表 1 输出窗口材料性能

Tab.1 Material characteristic of output windows

Item	ZnSe	GaAs
Bulk absorption coefficient/cm ⁻¹	0.001	0.01
Thermal conductivity/W·cm ⁻¹ ·°C ⁻¹	0.18	0.48
Specific heat/J·g ⁻¹ ·°C ⁻¹	0.356	0.325
Linear expansion coefficient/°C ⁻¹	7.57×10 ⁻⁶	5.7×10 ⁻⁶
Young's model/GPa	67.2	83
Rupture modulus/MPa	55.1	138
Density/g·cm ⁻³	5.27	5.37
Poisson's ratio	0.28	0.31

2.2 输出窗口模型和边界条件

根据实验室自研的 10 kW 级 TEA CO₂ 激光器谐振腔结构, 激光器输出窗口直径为 80 mm, 厚度为 9 mm, 采用端面夹持固定方式; 谐振腔内振荡形成激光光斑直径为 50 mm, 垂直照射在输出窗口中心;

输出窗口激光照射以外的区域均与外界环境进行热量交换。激光器工作时实验室环境温度为 20 °C, 谐振腔内工作气体在压气机作用下循环流动, 将工作气体电离产生的热量通过水冷循环系统传递至谐振腔外, 维持腔内工作气体温度与外界环境温度一致。激光器工作时, 腔内工作气体压力为 75 kPa, 腔外环境气压为 100 kPa, 形成 25 kPa 压力作用在输出窗口的激光出射面。由于两种材料的吸收率相差较大, 文中取两种材料输出窗口发射激光的平均功率均为 10 kW, 根据表 1 中两种材料的吸收率, ZnSe 窗口的净吸收功率为 9 W, GaAs 窗口净吸收功率为 91 W。

按激光作用区域可将输出窗口可分割成激光照射区域和照射外区域两部分。如图 2 所示分别采用正六面体网格对输出窗口两部分进行网格划分。并对交界面网格节点进行耦合。根据边界条件设置求解参数, 采用非稳态求解方法计算 10 kW 激光照射 60 s 的过程中输出窗口温度、热变形和热应力等参数分布。

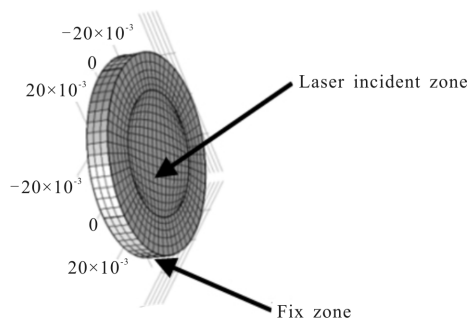


图 2 输出窗口网格模型

Fig.2 Mesh model for output window

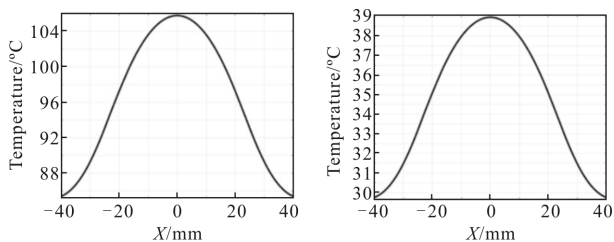
3 计算结果与分析

3.1 输出窗口温度分析

激光器工作过程输出窗口吸收部分激光能量使窗口温度发生变化。为表征输出窗口温度的变化规律, 分别计算输出窗口激光出射面的径向温度分布和输出窗口横截面温度分布。

如图 3、图 4 所示, 在所述条件下, 激光作用 60 s 时, 两种材料形成的输出窗口温度分布形式基本一致, 由于激光通过窗口中心发射, 输出窗口中心温度最高, 向边缘逐渐降低; 激光入射面温度最高, 由入射面到出射面温度逐渐降低。GaAs 窗口的最高温度

为 110 °C,窗口端面温度最低,为 86.7 °C;ZnSe 材料输出窗口中心的最高温度为 41 °C,窗口端面的最低温度为 30.3 °C。产生这种现象的主要原因是计算过程中两种材料制备的输出窗口对应的边界条件一致,温度分布形式相同;但 ZnSe 材料的吸收率低,吸收的激光功率小,导致其温度要低于 GaAs 材料。

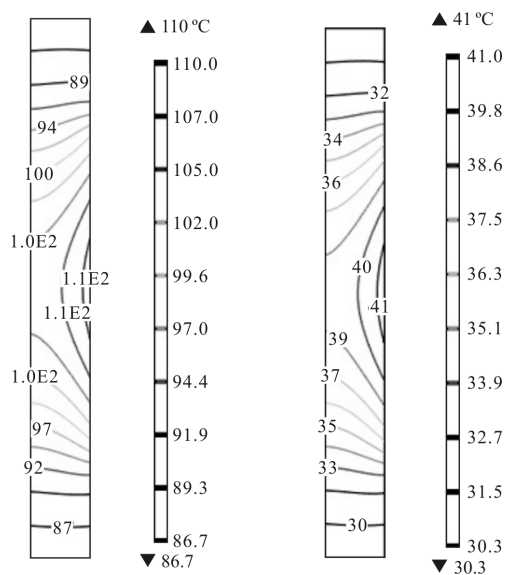


(a) GaAs 输出窗口 (b) ZnSe 输出窗口
(a) GaAs output window (b) ZnSe output window

图 3 输出窗口径向温度分布

Fig.3 Temperature distribution of output window along radius

direction

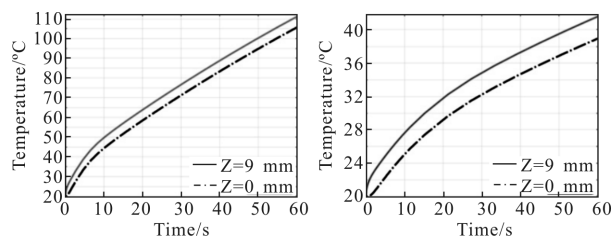


(a) GaAs 输出窗口 (b) ZnSe 输出窗口
(a) GaAs output window (b) ZnSe output window

图 4 输出窗口横截面温度分布

Fig.4 Temperature distribution of output window in cross-section

图 5 表示输出窗口中心点温度随时间的变化。在激光发射过程,输出窗口温度始终处于上升状态;发射起始阶段温度升高较快,然后升温速度降低;输出窗口激光出射面中心点温度始终低于入射面中心点温度。



(a) GaAs 输出窗口 (b) ZnSe 输出窗口

(a) GaAs output window (b) ZnSe output window

图 5 输出面中心点和入射面中心点温度分布

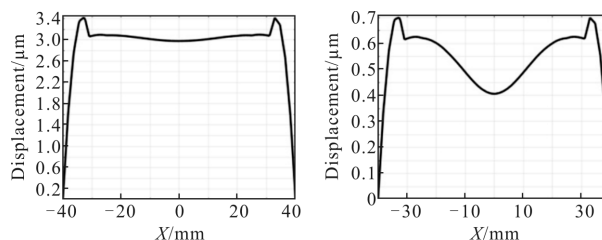
Fig.5 Temperature distribution of center at output side and incident side

3.2 输出窗口变形分析

输出窗口热变形主要由三部分组成:窗口材料沿激光传播方向的线膨胀变形;窗口热应力引起的变形;窗口端面受限制,在径向不能自由膨胀产生的挠曲变形。

激光传输过程中,输出窗口沿激光传输方向(Z轴)的变形影响激光的传输性质,因此采用 Z 轴的位移表示输出窗口热变形量。

图 6 表示激光作用 60 s 时,输出窗口出射面径向变形分布。输出窗口端面受限不能自由膨胀,窗口呈现出明显的挠曲变形环带。由于两种材料的物理性质不同,并且吸收的激光能量不同,GaAs 窗口变形大于 ZnSe 窗口。激光光斑位于挠曲变形环带内,GaAs 窗口平均变形为 3 μm,最大变形与最小变形差值为 0.1 μm,ZnSe 窗口平均变形为 0.5 μm,最大变形与最小变形差为 0.23 μm,两种材料均在窗口中心处变形最小。



(a) GaAs 输出窗口 (b) ZnSe 输出窗口

(a) GaAs output window (b) ZnSe output window

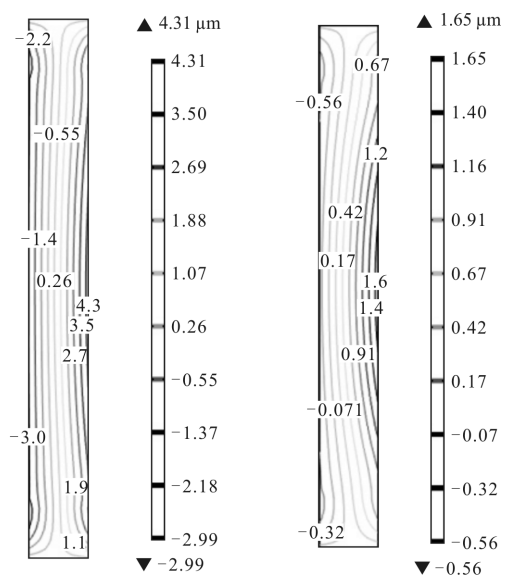
图 6 输出窗口径向变形分布

Fig.6 Displacement distribution of output window along radius

direction

图 7 表示激光作用 60 s 时,输出窗口横截面热变形等值线分布。由于 GaAs 材料热导率大,热量快

速传导,除由于端面限制产生的挠曲变形区域,输出窗口相同厚度截面热变形基本一致;ZnSe 材料热导率小,热量传导速度慢,形成以激光入射面为中心,向四周扩散的热变形分布,ZnSe 窗口相同厚度截面的热变形差异较大。两种材料制备的输出窗口均在激光入射面产生最大热变形,GaAs 窗口的最大热变形为 4.3 μm,ZnSe 窗口的最大热变形为 1.6 μm。



(a) GaAs 输出窗口 (b) ZnSe 输出窗口
(a) GaAs output window (b) ZnSe output window

图 7 输出窗口横截面热变形分布

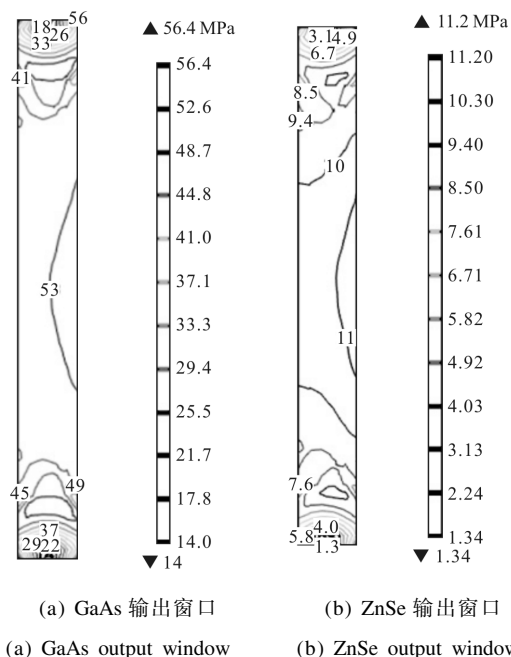
Fig.7 Displacement distribution of output window in cross-section

3.3 输出窗口热应力分析

输出窗口吸收激光能量产生热变形,形成热应力。为保证窗口性能,输出窗口热变形应处于弹性变形状态,对应的热应力小于材料的屈服极限。文中采用 von Mises 屈服准则,通过计算输出窗口 von Mises 应力分布,判断输出窗口所处的应力状态。

图 8 表示激光作用 60 s 时,输出窗口横截面应力等值线分布。GaAs 窗口形成的热应力最大值为 56.4 MPa,ZnSe 窗口形成的热应力最大值为 11.2 MPa,GaAs 窗口的最大热应力约为 ZnSe 窗口应力的 5 倍。由于输出窗口端面对变形限制,在输出窗口端面附近区域形成明显的应力集中;激光照射区域热变形较大,形成的应力值较大;ZnSe 窗口的热应力分布与热变形分布相似,由激光照射区域向外呈放射性

分布;GaAs 窗口热变形分布较为均匀,对应的热应力分布也相对均匀。



(a) GaAs 输出窗口 (b) ZnSe 输出窗口
(a) GaAs output window (b) ZnSe output window

图 8 输出窗口横截面应力分布

Fig.8 von Mises stress distribution of output window in cross-section

两种材料的屈服极限值分别为 138 MPa 和 55.1 MPa。当激光作用 60 s 时,两种材料制备的输出窗口形成的最大应力均小于对应材料的屈服极限,输出窗口处于弹性变形状态,窗口不发生塑性变形损伤。

4 结论

文中建立了大功率 CO₂ 激光器输出窗口非稳态传热学与结构力学耦合模型,数值计算了 GaAs 材料和 ZnSe 材料制备的激光输出窗口在 10 kW 激光作用 60 s 时的温度、热变形及热应力分布。由于 GaAs 材料吸收率大,GaAs 窗口的温升大于 ZnSe 窗口。两种输出窗口可形成 μm 量级的表面变形;输出窗口端面固定,限制了窗口沿径向膨胀,在窗口近端面处形成明显的挠曲变形带;由于 GaAs 材料的热导率高,窗口内热变形分布较均匀。输出窗口激光照射区域热应力较大,窗口近端面处由于挠曲变形产生应力集中,激光作用过程中两种输出窗口形成的应力均小于材料屈服极限,保证输出窗口均处于弹性变形状态。

参考文献:

- [1] Yang Guilong, Li Dianjun, Xie Jijiang, et al. High power repetitive TEA CO₂ pulsed laser [J]. *Laser Physics*, 2012, 22(7): 1173–1176.
- [2] Tang Wei, Guo Jin, Shao Junfeng, et al. Analysis of far-field characteristics with repetition frequency of TEA CO₂ laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2380–2385. (in Chinese)
汤伟, 郭劲, 邵俊峰, 等. 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[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2380–2385.
- [3] Wang Xi, Bian Jintian, Li Hua, et al. Experiment on damage in K9 glass due to repetition rate pulsed CO₂ laser radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1204–1207. (in Chinese)
王玺, 卞进田, 李华, 等. 重频脉冲 CO₂ 激光损伤 K9 玻璃的实验[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(5): 1204–1207.
- [4] Zhang Kuo, Lu Jun, Yang Guilong, et al. Estimation of the far-field divergence of high power TEA CO₂ laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2286–2291. (in Chinese)
张阔, 陆君, 杨贵龙, 等. 大功率 TEA CO₂ 激光远场发散角评估方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2286–2291.
- [5] Xie Jijiang, Li Dianjun, Zhang Chuansheng, et al. Acousto-optically Q-switch CO₂ laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(5): 1008–1013. (in Chinese)
谢冀江, 李殿军, 张传胜, 等. 声光调 Q CO₂ 激光器[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1008–1013.
- [6] Ku Geng, Cheng Zuhai, Zhang Yaoning, et al. Research of laser reflectors cooled by a thermoelectric refrigerator [J]. *Chinese Journal of Laser*, 1998, 25(2): 123–126. (in Chinese)
库耕, 程祖海, 张耀宁, 等. 高功率激光反射镜变形的半导体致冷补偿的研究[J]. 中国激光, 1998, 25(2): 123–126.
- [7] Yu Wenfeng, Sun Feng, Cheng Zuhai, et al. Optimum design of phase-change cooling mirror's fabrication by finite element method [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(12): 1523–1526. (in Chinese)
余文峰, 孙峰, 程祖海, 等. 相变致冷镜的有限元结构优化[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(12): 1523–1526.
- [8] Yu Liangying, Cheng Zuhai, Zhu Haihong, et al. Thermal deformation for thermal compensation mirror [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, 5(2): 12–15. (in Chinese)
余亮英, 程祖海, 朱海红, 等. 热补偿腔镜热变形的研究[J]. 光学与光电技术, 2007, 5(2): 12–15.
- [9] Peng Yufeng, Cheng Zuhai, Zhang Yaoning, et al. Temperature distribution and thermal deformations of mirror substrates in laser resonators[J]. *Apply Optics*, 2001, 40(27): 4824–4830.
- [10] Feng Zhiqing, Bai Lan, Zhang Zengbao, et al. Thermal deformation compensation of high-energy laser mirrors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1781–1787. (in Chinese)
冯志庆, 白兰, 张增宝, 等. 高能激光反射镜热变形补偿[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1781–1787.
- [11] Peng Yufeng, Sheng Zhaoxia, Zhang Hu, et al. Influence of thermal deformations of the output windows of high-power laser system on beam characteristics [J]. *Apply Optics*, 2004, 43(35): 6465–6472.
- [12] Sun Feng, Cheng Zuhai, Zhang Yaoning, et al. Thermal distortions in Calcium Fluoride, Potassium Chloride and Fused Silica windows at 1.315 μm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(4): 412–416. (in Chinese)
孙峰, 程祖海, 张耀宁, 等. 在波长 1.315 μm 下的几种激光器窗口热效应比较研究[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 412–416.
- [13] An Jianzhu, Li Youkuan, Du Xiangwan. Influence of laser window's thermal lensing effect on beam quality[J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2004, 16(4): 429–433. (in Chinese)
安建祝, 李有宽, 杜祥琬. 激光窗口热透镜效应对光束质量的影响[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(4): 429–433.