

文章编号 :1001-4322(2004)04-0429-05

激光窗口热透镜效应对光束质量的影响*

安建祝, 李有宽, 杜祥琬

(北京应用物理与计算数学研究所,北京 100088)

摘 要: 分析了高功率激光通过窗口时,引起的窗口热透镜效应及其对激光光束质量的影响。用冲量定理方法,推导了二维热传导方程的广义傅里叶级数解,然后按照平面热应力问题,运用有限元方法数值计算热变形。考虑热变形、折射率随温度变化,忽略光弹性效应,解出出光面的波前相差分布,讨论了远场光束质量。以空心环形光束为例,计算了熔融石英(SiO₂)和白宝石(Al₂O₃)两种常用窗口的温升分布、热变形、波前相差和光束质量,分析了冷却、辐照时间、光强分布的空间梯度和各种材料参数对光束质量的影响。

关键词: 激光; 窗口; 热透镜效应; 光束质量

中图分类号: TN248

文献标识码: A

激光通过窗口时,窗口吸收部分激光能量,产生热透镜效应,会影响激光的传播方向和远场的能量集中度。对于高功率激光此效应会显著影响光束质量。因此,开展这方面的研究,对于激光系统设计和光束质量控制有实际意义。窗口的吸收系数很小,对激光能量的减少可以忽略,因此可以认为窗口对激光的吸收是均匀体吸收,且由于窗口的厚度远小于直径,所以忽略温升分布在厚度方向的不均匀及由此产生的热应力、热变形是合适的。再者,一般高功率激光系统的输出光束多为非对称的,因此将窗口的热透镜效应处理为径向和环向的二维问题是必要的也是充分的。本文给出了求解二维温度分布的解析方法,得到广义傅里叶级数形式的解析解,热变形的求解则采用有限元方法,编写了计算机程序。对比讨论了两种常用窗口熔融石英(SiO₂)和白宝石(Al₂O₃)的温度分布、热变形、波前相差和光束质量,分析了冷却、辐照时间、光强分布的空间梯度和各种材料参数对光束质量的影响,为高能激光系统中窗口的选择和光束质量控制提供参考。

1 理 论

设激光光束沿 z 轴正方向垂直入射并通过厚度为 d ,半径为 R 的窗口。窗口吸收部分激光能量而升温。一般情况下有 $d \ll R$,可以忽略厚度方向的热传导,即假设在厚度方向上温度保持不变。则热传导方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} - \frac{h_f T}{d} + \frac{1}{\rho c_p} P(r, \theta) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad 0 \leq r \leq R, 0 \leq \theta < 2\pi \quad (1a)$$

初始条件 $T = 0, \quad t = 0 \quad (1b)$

边界条件 $\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{h_c T}{d}, \quad r = R \quad (1c)$

式中: α 为热传导系数; $\frac{1}{\rho c_p}$ 为热扩散系数, ρ 为材料密度, c_p 为质量定压热容; $P(r, \theta)$ 是单位体积吸收的激光功率; h_f, h_c 分别是窗口表面和边缘与环境的对流热交换系数。

求解方程(1)有多种方法,本文采用冲量定理法^[1],解的形式为

$$T(r, \theta, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{\exp[-(\lambda_{mp}^2 + h_f/d)(t - t_0)]}{N(\lambda_{mp})} J_m(\lambda_{mp} r) [A_{mp} \cos(m\theta) + B_{mp} \sin(m\theta)] \quad (2)$$

式中: J_m 为 m 阶贝塞尔函数; λ_{mp} 由边界条件(1c)得到

$$\frac{dJ_m(\lambda_{mp} r)}{dr} + \frac{h_c}{d} J_m(\lambda_{mp} r) \Big|_{r=R} = 0, \quad r = R \quad (3)$$

A_{mp}, B_{mp} 是 $P(r, \theta)$ 关于基 $\{J_m(\lambda_{mp} r)\}, \{\cos(m\theta), \sin(m\theta)\}$ 展开的系数

$$A_{mp} = \frac{1}{\rho c_p} \int_0^R \int_0^{2\pi} \cos(m\theta) J_m(\lambda_{mp} r) P(r, \theta) r dr d\theta \quad (4)$$

* 收稿日期:2003-07-04; 修订日期:2003-11-04

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:安建祝(1970—),男,博士研究生,主要从事激光技术研究;北京 8009 信箱 11 分箱;E-mail:an700930@yahoo.com.cn.

$$B_{mp} = \frac{1}{N(m_{mp})} \int_0^R \int_0^{2\pi} \sin(m\theta) J_m(m_{mp}r) P(r, \theta) r dr d\theta \quad (5)$$

而 $N(m_{mp})$, m 是归一化因子, $N(m_{mp}) = \frac{1}{2} (R^2 - \frac{m^2}{m_{mp}^2} + \frac{R^2}{2} \frac{h_c^2}{m_{mp}^2}) J_m^2(m_{mp})$, $m = \begin{cases} 1/2, & m = 0; \\ 1/, & m = 0. \end{cases}$ 当物体升温时,产生热应力。由于 $d \ll R$,可以简化为平面应力问题($z = 0$)。物体的应变满足本构关系^[6]

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu}{E} \sigma_y + \alpha T, \quad \epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu}{E} \sigma_x + \alpha T, \quad \epsilon_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \quad (6)$$

式中: α 是材料的线性热膨胀系数; ν 是泊松比; E 是杨氏模量。假设窗口边界无外力约束。本文采用四边形八节点等参数单元的有限元方法求解^[7]热应力。则厚度方向的热应变为

$$d = \alpha dT - (\epsilon_x + \epsilon_y) d/E \quad (7)$$

光通过窗口镜后附加一个相位

$$\phi = k[(n-1)d + d n] \quad (8)$$

式中: k 为波矢; n 是材料折射率。折射率变化原因:一是温度变化引起的折射率变化,即热光效应;二是应力引起的折射率变化,即弹光效应,一般,后者远小于前者,可忽略^[2,3]。 dn/dT 是热光系数即

$$n = \frac{dn}{dT} T \quad (9)$$

窗口对光束质量的影响就是研究激光光束通过窗口后传播到远场时的能量集中度,忽略通过窗口前后激光能量的变化。假设窗口处的场强为 $E_1(x_1, y_1)$, 相距 L 处与窗口镜平行的屏上的场强为 $E_2(x_2, y_2)$ 。由 Collins 衍射公式^[5]表示为

$$E_2(x_2, y_2) = \frac{i \exp(i k L)}{L} \exp\left[\frac{i k}{2L} (x_2^2 + y_2^2)\right] \int \int_S dx_1 dy_1 E_1(x_1, y_1) \exp(i \phi) \exp\left[\frac{2i}{L} (x_2 x_1 + y_2 y_1)\right] \quad (10)$$

能量 $I(x_2, y_2) = C |E_2(x_2, y_2)|^2$, C 是常数。单位立体角中的能量 $I(x_2, y_2) L^2$ 是发散角 $x_2/L, y_2/L$ 的函数,与 L 无关。

2 空心环形光束

下面讨论非对称的空心环形光束。激光波长为 $1.315 \mu\text{m}$, 以石英和白宝石两种窗口为例,取两种窗口单位体积吸收相同激光功率。材料参数见表 1。

表 1 主要材料参数^[4,9]

Table 1 Values of chief parameters of materials

material	mass density / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	specific heat C_p / ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	thermal expansion coeff. α / K^{-1}	Poisson's ratio	thermal conductivity $k / (\text{W} \cdot \text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	absorption coeff. μ / m^{-1}	refractive index n	thermal-optic coeff. $(dn/dT) / \text{K}^{-1}$
SiO ₂	2 200	753	0.42×10^{-6}	0.17	1.4	0.24	1.45	1.10×10^{-5}
Al ₂ O ₃	3 980	753	5.6×10^{-6}	0.27	34	0.11	1.76	1.41×10^{-5}

单位体积材料吸收的激光功率假设为

$$P(r, \theta) = \begin{cases} \mu(1 + r \cos \theta), & a \leq r \leq b \\ 0, & r < a, \text{ or } r > b \end{cases} \quad (11)$$

式中: a, b 是空心环形光束的内、外半径; μ 为光强分布的空间梯度。窗口尺寸 $R = 4.5 \text{cm}$, $d = 0.9 \text{cm}$, $a = 1.0 \text{cm}$, $b = 3.0 \text{cm}$, $\mu = 10 \text{m}^{-1}$, 石英窗口 $I = 1.276 \text{W/cm}^2$, 白宝石窗口 $I = 2.785 \text{W/cm}^2$, 平均吸收功率同为 306W/cm^2 。由(1a)式,只有当 $h_f T/d = P(r, \theta)$ 时,冷却才起作用,而一般情况下,对窗口镜采用气体冷却,其对流热交换系数 h_f 约 $10 \text{W/m}^2 \text{K}$,所以冷却窗口镜对光束质量的改善非常有限,对于高功率激光,可以不考虑。

图 1 示出上述条件下,激光出光 4s 时,白宝石窗口表面的温升分布,局部最高温升 4.24 K。图 2 示出石英窗口表面的温升分布,局部最高温升 8.71 K。可见,由于石英的热传导率很小,所以吸收同样的能量,石英窗口的受激光幅照部分温升高,温升分布梯度大。图 3 示出激光出光 4s 时白宝石和石英窗口的厚度方向热变形分布,其最大值分别为 $0.248 \mu\text{m}$ 和 $0.037 \mu\text{m}$,这是因为石英的热膨胀系数较小。图 4 示出激光出光 4s 时白宝石和石英窗口出光面的波前相差分布,其最大值分别为 3.47rad 和 5.46rad。与温升分布相同,石英窗口的受激光幅照部分波前相差大,波前相差梯度也较大。

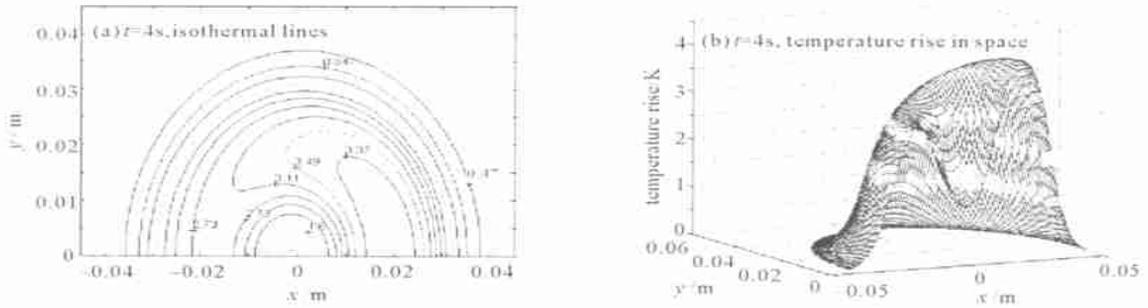


Fig. 1 $t=4s$ temperature rise in Al_2O_3 window with laser beam going through.
 图 1 出光时间 4s 时, 蓝宝石窗口温升分布的等值线图(a)和三维图(b)

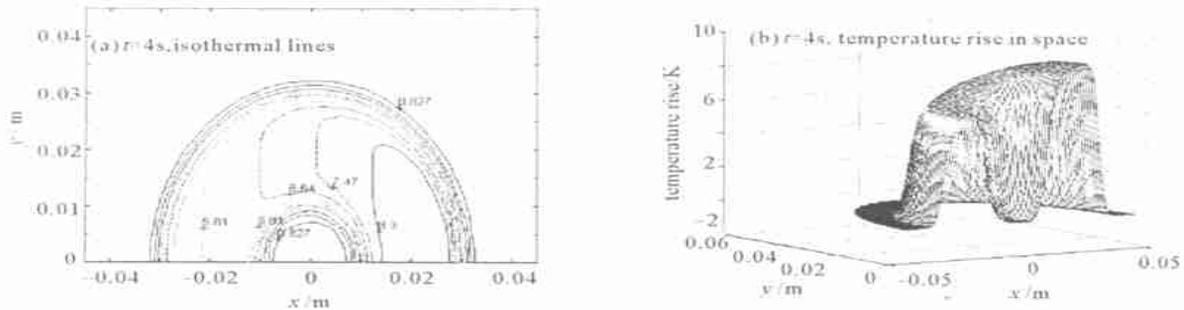


Fig. 2 Temperature rise in SiO_2 window with laser beam going through
 图 2 出光时间 4s 时, 石英窗口温升分布的等值线图(a)和三维图(b)

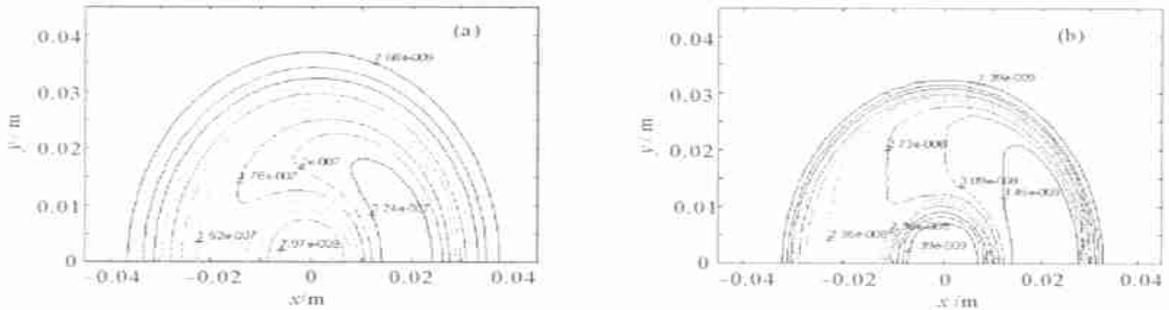


Fig. 3 Thermal deformation in the window, (a) for Al_2O_3 window and (b) for SiO_2 window
 图 3 出光时间 4s 时, 热变形分布的等值线图. (a) Al_2O_3 窗, (b) SiO_2 窗

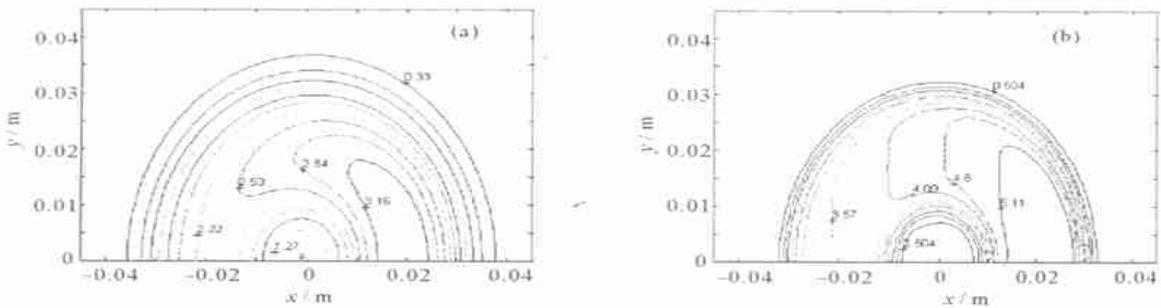
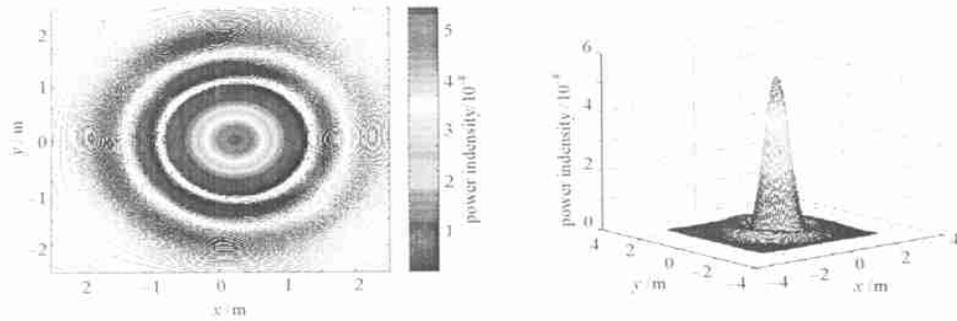


Fig. 4 Aberration of the output laser beam, (a) for Al_2O_3 window and (b) for SiO_2 window
 图 4 出光时间 4s 时, 激光在出光面有波前相差分布的等值线图. (a) Al_2O_3 窗, (b) SiO_2 窗

图 5 和图 6 示出激光束附加图 4 所示的波前相差后传输到远场时的光场强度分布。图中光场强度的数值已做了处理, 乘以 I 才是实际值。可见, 光束的传播方向发生了改变, 光斑有所扩大, 且不再对称。光束通过蓝宝石窗口后, 光束质心沿 x 轴方向偏离 $0.056 / D$, 环围 50% 能量和 83.8% 能量的光斑角半径分别是 $0.77, 2.73 / D$, 光束通过石英窗口后以上三个值为 $0.288, 0.91, 4.01 / D$, 此光束无波前相差直接传输到远场, 环围 50% 能量和 83.8% 能量的光斑角半径是 $0.61, 1.85 / D$ 。

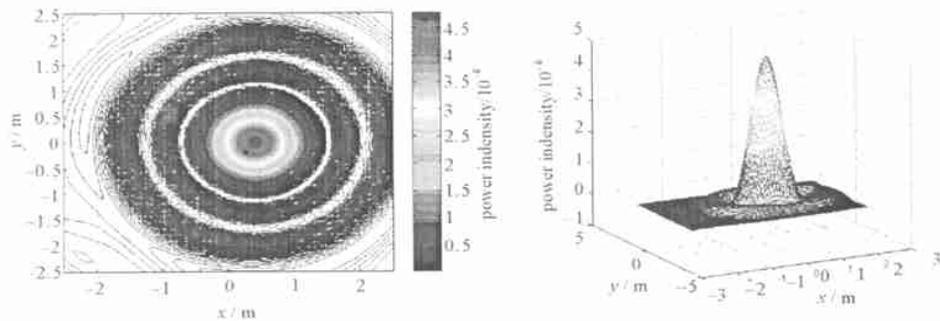
图 7(b) 示出激光出光 4s 时, 远场光斑角半径与环围能量的关系, 光束通过窗口和无波前相差传输到远场



(a) $t = 4s$. contour of power intensity (b) $t = 4s$. power intensity in space

Fig. 5 Energy intensity of laser beam on focus plane after going through Al_2O_3 window

图5 出光时间4s时,激光通过白宝石窗口后在远场的能量密度分布轮廓图(a)和三维图(b)



(a) $t = 4s$. contour of power intensity (b) $t = 4s$. isothermal rise in space

Fig. 6 Energy intensity of laser beam on focus plane after going through SiO_2 window

图6 出光时间4s时,激光通过石英窗口后在远场的能量密度分布轮廓图(a)和三维图(b)

相比,随着环围能量的增加差值逐渐增大,在第一暗环(约50%能量)附近达到极大,之后有一段差值较小,到第二暗环(约80%能量)又开始增大。所以,光斑对不同的环围能量扩大程度不同。图7(a)示出环围50%和83.8%能量的角半径随出光时间的变化情况,对83.8%环围能量白宝石和石英窗口,最佳出光时间约2.5s;对50%环围能量,石英窗口的最佳出光时间是约4.0s,白宝石窗口在5.0s范围内角半径变化不大。

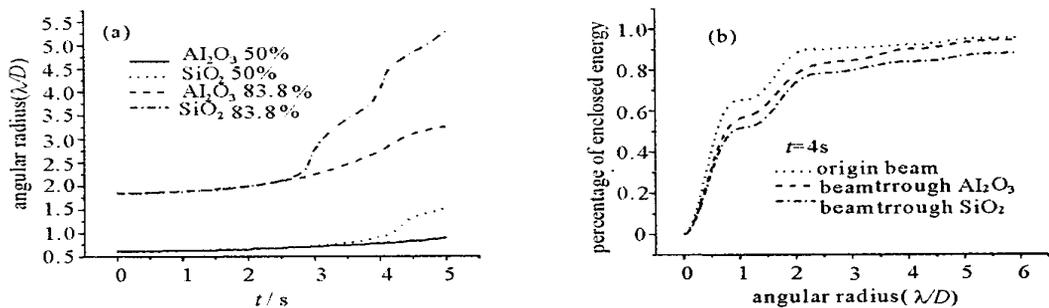


Fig. 7 (a) Angular radius enclosing 83.8% or 50% of the total power vs irradiation time,

(b) percentage of the total power vs angular radius at 4s

图7 (a) 环围83.8%,50%能量的角半径与出光时间的关系;(b) 出光时间4s时,角半径与环围能量的关系

对非对称光束,热透镜效应不仅影响光束的远场能量集中度,还造成传播方向改变,即光束质心偏移。图8(a)示出光束通过窗口后,光束质心偏移量与激光出光时间的关系,呈近线性关系。可见由于石英窗口出光面的波前相差梯度较大,所以偏移量较大。图8(b)示出激光出光4s时,光束质心偏移量与光强分布的空间梯度的关系,由图表明呈线性关系,石英窗口的梯度较大。

3 结论

本文对高功率激光窗口的热透镜效应及其对光束质量的影响进行了研讨,给出了热传导方程的解析解,用有限元方法求解热应力,并研究了远场的光束质量。编制了计算机程序,以波长为 $1.315\mu m$ 的空心环形光束为例研究了白宝石和石英两种窗口。

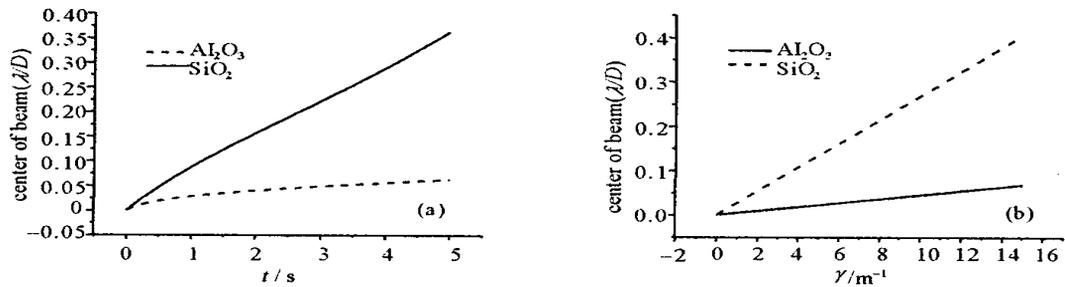


Fig.8 Shift of laser beam center vs irradiation time (a) and spatial gradient of laser power at 4s (b)

图8 光束质心偏移量与出光时间的关系(a)和出光时间4s时光束质心偏移量与光强空间梯度的关系(b)

对非轴对称激光,单一的评价标准不能完全反映光束质量。例如本文的非轴对称光束,热透镜效应影响了光束的能量集中度,对周围不同能量的光斑有不同程度的扩大,还造成了光束质心偏移。

对于本文所用的空心环形光束,相同的吸收功率和窗口尺寸($\phi 9\text{cm} \times 0.9\text{cm}$)下,出光4s时,石英、白宝石窗口的最大温升分别为8.71K和4.24K,最大热变形分别为 $0.037\mu\text{m}$ 和 $0.248\mu\text{m}$,最大波前相差分别为5.46rad和3.47rad,环围能量为总能量83.8%的角半径分别为 $4.01/D$ 和 $2.73/D$ (理想为 $1.85/D$),环围能量为总能量50.0%的角半径分别为 $0.91/D$ 和 $0.77/D$ (理想为 $0.61/D$),光束质心偏移分别为 $0.288/D$ 和 $0.056/D$ 。两种窗口相比较,白宝石的热传导率较大,使得其温升分布和波前相差梯度较小,从而有较小的光束质心偏离和较高的远场能量集中度,光束质量较好。此外,存在最佳出光时间,对83.8%环围能量两种窗口都有最佳出光时间,约2.5s;对50%环围能量石英窗口的最佳出光时间是约4.0s。

在本文研究范围内,光束质心偏移与时间和光强空间分布梯度都呈近线形关系,由于石英的热传导率较小,其窗口的光束质心偏移随时间和光强空间分布梯度增长较快。

参考文献:

- [1] Peng Y F, Cheng Z H, Zhang Y N, et al. Laser induced temperature distributions and thermal deformations in sapphire, silicon, and calcium fluoride substrates at $1.315\mu\text{m}$ [J]. *Opt Eng*, 2001, **40**(12):2822—2829.
- [2] Billman K W, Tran D C, Johnson L F. Development of low-OPD windows for airborne laser[A]. *Proc SPIE[C]*, 2001, **4376**:24—34.
- [3] Klein C A. Materials for high-power laser optics: figures of merit for thermally induced beam distortions[J]. *Opt Eng*, 1997, **36**(6), 1586—1595.
- [4] Sparks M. Optical distortion by heated windows in high-power laser systems[J]. *Journal of Applied Physics*, 1971, **42**(12), 5029—5046.
- [5] 羊国光,宋菲君.高等物理光学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1991.(Yang G G, Song F J. Advanced physical optics. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1991)
- [6] 陈国荣.弹性力学[M].南京:河海大学出版社,2002.(Chen G R. Elasticity mechanics. Nanjing: Press of Hehai University, 2002)
- [7] 殷家驹,张元冲.计算力学教程[M].西安:西安交通大学出版社,1992.(Yin J J, Zhang Y C. Tutorial of computational mechanics. Xi an: Press of Xi an Jiaotong University, 1992)
- [8] American Institute of Physics Handbook(2nd edition)[M]. New York:McGraw-Hill,1963.

Influence of laser window's thermal lensing effect on beam quality

AN Jian-zhu, LI You-kuan, DU Xiang-wan

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088, China)

Abstract: This paper concerns the thermal lensing effect that occurs as laser going through an optical window, and its influence on beam quality. By the method of impetus theorem, 2D solution of the thermal conduction equation is derived, in the form of generalized Fourier series. Then, the finite element method is applied to simulate the thermal deformation as a plane stress problem. Combined with the thermal deformation and the shift of the refractive index with the temperature, the wavefront distortion is calculated without considering the optic stress effect. Furthermore, the beam quality on far field is discussed. Temperature rise, thermal deformation, wavefront distortion and beam quality of fused quartz (SiO_2) window and white bijou (Al_2O_3) window irradiated by the annulus beam are simulated as examples. The influence of cooling window, the laser output duration and spatial gradient of the beam energy intensity, and material parameters on the beam quality is analyzed.

Key words: Laser; Window; Thermal lensing effect; Beam quality