

文章编号: 1001-3806(2005)05-0452-03

强激光束辐照下窗口材料热力效应数值模拟

王伟平¹, 谭福利¹, 吕百达²

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621900; 2. 四川大学 激光物理与化学研究所, 成都 610064)

摘要: 基于三维瞬态热传导方程和弹性应力-应变方程, 研究了空心环形强激光束 (波长 1.315 μm) 辐照下白宝石窗口温度、变形和应力的分布规律; 研究了空心矩形强激光束 (波长 3.8 μm) 辐照下氟玻璃窗口温度、变形和应力的分布规律。采用三维有限元模型, 数值模拟了强激光在窗口材料中产生的热和力学效应, 为强激光窗口元件的选择以及热效应对光束质量影响的评估提供了参考。计算中, 激光能量吸收采用体吸收, 并考虑了光强分布的空间梯度以及光强在窗口内的衰减。

关键词: 激光光学; 强激光; 光学窗口; 温度场; 变形; 应力

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A

Thermal deformation of optical windows irradiated by high power laser beam

WANG Wei-ping¹, TAN Fu-li¹, LÜ Bai-da²

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China; 2. Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Based on three dimensional transient heat conduction equation and elastic stress-strain equation, the temperature rise, distortion and equivalent stress distribution of white bijou window irradiated by high power annular beam ($\lambda = 1.315\mu\text{m}$) are simulated using a three dimensional finite element model (FEM). The temperature rise, distortion and equivalent stress distribution of fluoride glass window induced by high power hollow rectangular laser beam ($\lambda = 3.8\mu\text{m}$) are also simulated. Laser intensity spatial gradient and attenuation in window are considered in computational model.

Key words: laser optics; high power laser; optical window; temperature field; distortion; stress

引 言

强激光束通过窗口材料时, 部分的激光能量会被吸收, 由此引起激光窗口的热变形, 进而引起激光束波前畸变, 影响远场光束质量。严重的情况下, 窗口可能会在热应力作用下破裂。文献 [1]~[5] 中对高功率激光窗口的热畸变以及对光束质量的影响进行了理论和数值模拟研究。对于理论和数值模拟研究, 一般仅作了简化处理, 常常未考虑光束强度的非对称分布。作者采用三维有限元模型, 数值模拟了强激光在窗口材料中产生的热和力学效应, 为强激光窗口元件的选择以及热效应对光束质量影响的评估提供参考。

1 物理模型与相关条件

白宝石窗口对近红外激光的吸收系数假设为 $A_w = 0.25\text{m}^{-1}$, 氟玻璃窗口对中红外激光的吸收系数假设

为 $A_F = 1.2\text{m}^{-1}$ 。计算中, 白宝石窗口尺寸假设为 $\varnothing 120\text{mm} \times 10\text{mm}$ (厚度 h), 氟玻璃窗口尺寸假设为 $\varnothing 180\text{mm} \times 5\text{mm}$ (厚度 h)。窗口材料的热力学参数如表 1 所示^[6,7]。表 1 中, K, ρ, C, E, α 分别为材料的热导率、密度、比热容、弹性模量和热膨胀系数。

Table 1 Thermodynamic parameters of window materials

material	$K / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	E / GPa	$\alpha / 10^{-6} \text{K}^{-1}$
white bijou	25	3980	756	345	6.7
fluoride glass	11	3870	837	72	8

考虑到激光器谐振腔内增益介质的非均匀分布会造成输出光束强度分布不均匀 (一般情况下, 强度分布整体倾斜), 为了计算方便, 假设光束强度沿 x 方向呈线性递增分布, 光强沿 x 方向分布的空间梯度 $\gamma = 10\text{m}^{-1}$ 。对于白宝石窗口, 对应的激光束截面为空心环状分布, 外半径为 b , 内半径为 a 。取 $b = 0.05\text{m}$, $a = 0.02\text{m}$, 遮拦比 $e = a/b = 0.4$ 。对于氟玻璃窗口, 对应的激光束截面为空心矩形分布, 外尺寸为 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$, 内尺寸为 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 。激光能量吸收采用体吸收模型, 窗口内传输的激光强度随厚度指数衰减。热传导方程和应力-应变方程参考文献 [8] 中的表述。将

基金项目: 国家八六三计划资助项目 (863-802-4)

作者简介: 王伟平 (1970-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事激光效应研究。

E-mail: wwpwzc@yeah.net

收稿日期: 2004-08-02; 收到修改稿日期: 2004-09-13

窗口材料吸收的激光能量看成内热源,热传导方程中的体载荷能量密度 Q ,可以由下列各式得出。考虑一束激光垂直辐照在窗口表面,窗口材料内部的吸收系数 A 定义如下:

$$A = (dI/dz) / dz \quad (1)$$

式中, I 为光强, dz 为激光束传播距离的变化量, dI 为激光束传播 dz 距离后光强的变化量。由 (1) 式可得,正入射激光束辐照下,在某一时刻 t ,窗口内某一点 (x, y, z) 单位时间、单位体积沉积的能量为:

$$Q(x, y, z, t) = dI/dz = AI(x, y, z, t) \quad (2)$$

积分 (2) 式,并考虑到进入到窗口的激光强度为 $I_0(x, y, 0, t)$,可得窗口内激光强度的分布为:

$$I = I_0(x, y, 0, t) \exp \int_h^z A(z') dz' \quad (3)$$

将 (3) 式代入 (2) 式得:

$$Q(x, y, z, t) = AI_0(x, y, 0, t) \exp \int_h^z A(z') dz' \quad (4)$$

当 A 不随 z 变化时:

$$Q(x, y, z, t) = AI_0(x, y, 0, t) \exp[-A(h-z)] \quad (5)$$

式中, $A, I_0(x, y, 0, t), h$ 分别为窗口材料对强激光的体

吸收系数,进入到窗口迎光面的激光强度分布以及窗口厚度。

对于空心环形光束,

$$I(x, y, 0, t) = \begin{cases} I_0(1 + \gamma \cdot \chi) & a \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq b \text{ 和 } 0 < t \leq 4s \\ 0 & \sqrt{x^2 + y^2} < a \text{ 或 } \sqrt{x^2 + y^2} > b \end{cases} \quad (6)$$

对于空心正方形光束,

$$I(x, y, 0, t) = \begin{cases} I_0(1 + \gamma \cdot x) & n \leq |x| \leq m \text{ 和 } |y| \leq m \\ I_0(1 + \gamma \cdot x) & n \leq |y| \leq m \text{ 和 } |x| \leq m \\ 0 & |x| > m \text{ 或 } |y| > m \\ 0 & |x| < n \text{ 和 } |y| < n \end{cases} \quad (7)$$

式中,外正方形边长 $2m$,内正方形边长 $2n$ 。

2 计算结果与分析

2.1 白宝石窗口激光热效应

图 1 示出了 (5) 式中 AI_0 (即窗口迎光面附近单位

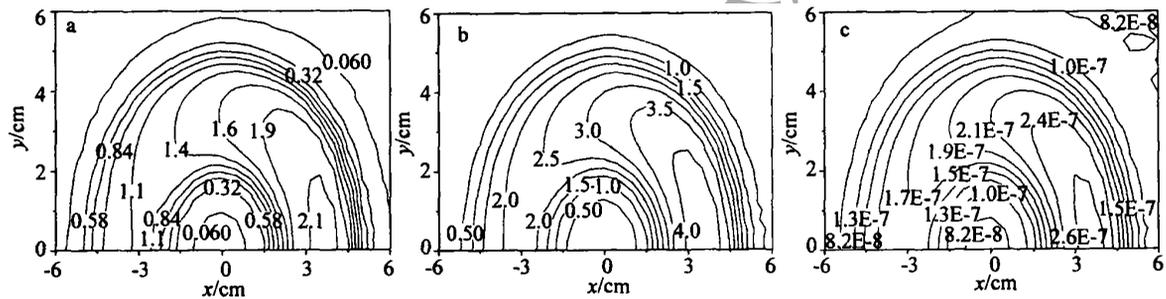


Fig 1 Front surface temperature and distortion distribution of white bijou window after high power annular beam going through a— $t=2s$, isothermal line b— $t=4s$, isothermal line c— $t=4s$, distortion isoline

体积吸收的平均激光功率)为 $2.5W/cm^3$,激光内半径 $0.02m$,遮拦比 $e=0.4$,光强沿 x 方向分布的空间梯度 $\gamma = 10m^{-1}$ 的环状近红外激光束垂直通过白宝石窗口后,在迎光面所产生的温度场和变形分布。由图可见,激光出光 $2s$,窗口局部最高温升约 $2.1C$;激光出光 $4s$,窗口局部最高温升约 $4C$ 。激光出光 $4s$,窗口局部最高变形约 $0.26\mu m$,相当于几分之一入射近红外激光波长。

图 2 示出了同样激光参数下,在迎光面所产生的应力分布。由图可见,激光出光 $4s$,窗口局部最高等效应力约 $9.4MPa$,远小于其断裂强度 $\sigma_b = 0.28GPa$,不会导致窗口破坏。由图 1 和图 2 可见,由于激光强度整体倾斜,窗口表面温升、变形和等效应力的分布也是整体倾斜的。

图 3 示出了上述激光束垂直通过白宝石窗口后,在窗口出光面所产生的温度场和变形分布。由图可见,激光出光 $4s$,窗口出光面局部最高温升也约 $4C$,与窗口迎光面最高温升接近,表明沿窗口厚度方向温

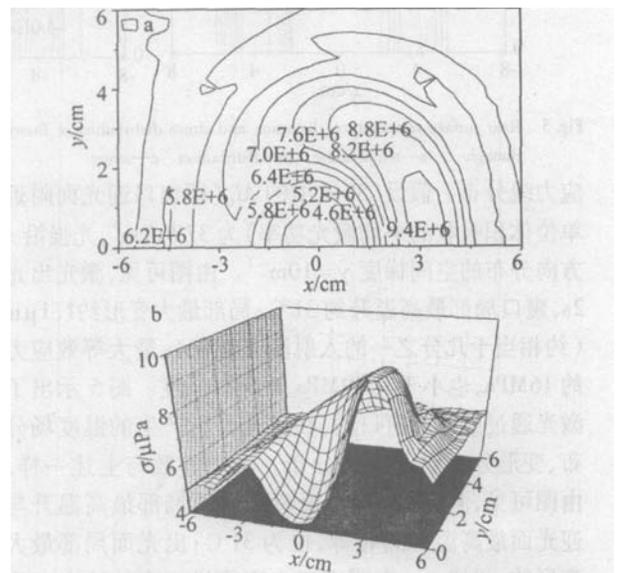


Fig 2 Front surface equivalent stress distribution of white bijou window after high power annular beam going through a— $t=4s$, stress isoline b— $t=4s$, three dimensional stress distribution

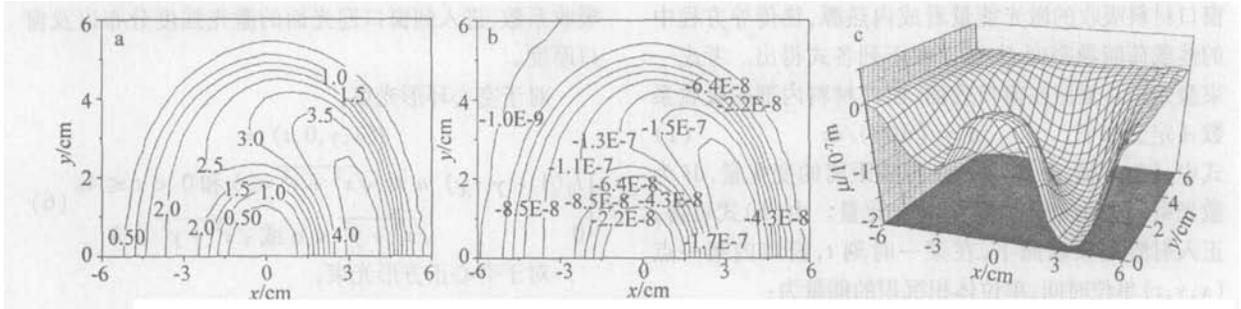


Fig 3 Rear surface temperature and distortion distribution of white bijou window after high power annular beam going through
 a— $t=4s$, isothermal line b— $t=4s$, distortion isoline c— $t=4s$, three dimensional distortion distribution

度基本不变,这是由于白宝石窗口吸收系数较小,沿厚度方向光强衰减减小。激光出光 4s,窗口出光面局部最高变形约 $-0.17\mu\text{m}$,表明窗口出光面沿光束行进方向最大伸长 $0.17\mu\text{m}$,加上迎光面的变形量,窗口厚度

最大总变形约 $0.43\mu\text{m}$ 。

2.2 氟玻璃窗口激光热力效应

图 4 示出了中红外空心矩形分布激光束通过氟玻璃窗口后,在迎光面所产生的等温线、等变形线、等

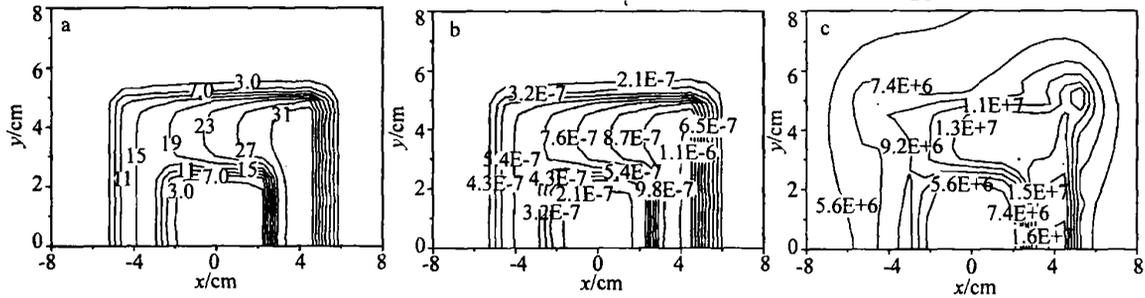


Fig 4 Front surface temperature, distortion and stress distribution of fluoride glass window after high power hollow rectangular laser beam going through
 a— $t=2s$, isothermal line b— $t=2s$, distortion isoline c— $t=2s$, stress isoline

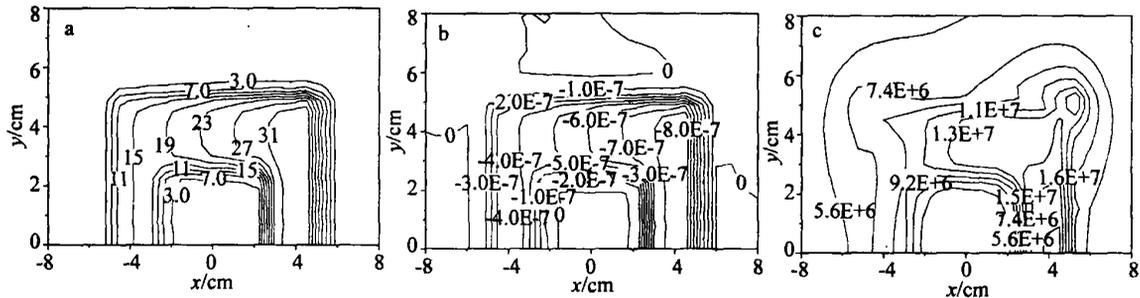


Fig 5 Rear surface temperature, distortion and stress distribution of fluoride glass window two seconds after high power hollow rectangular laser beam going through
 a—temperature b—distribution c—stress

应力线分布。假设 (5)式中的 A_0 (即窗口迎光面附近单位体积吸收的平均激光功率)为 $37\text{W}/\text{cm}^3$,光强沿 x 方向分布的空间梯度 $\gamma = 10\text{m}^{-1}$ 。由图可见,激光出光 2s,窗口局部最高温升约 31C ;局部最大变形约 $1.1\mu\text{m}$ (约相当于几分之一入射激光波长);最大等效应力约 16MPa ,也小于其 49MPa 的断裂强度。图 5 示出了激光通过氟玻璃窗口后,在出光面所产生的温度场分布、变形分布以及应力分布。光束参数与上述一样。由图可见,激光出光 2s,窗口出光面局部最高温升与迎光面最高温升约相等,也为 31C ;出光面局部最大变形约 $-0.8\mu\text{m}$,表明窗口出光面沿光束传输方向最大伸长 $0.8\mu\text{m}$,加上迎光面的变形量,窗口厚度最大总变形约 $1.9\mu\text{m}$,最大等效应力也近似为 16MPa 。

3 小结

基于三维瞬态热传导方程和弹性应力-应变方程,首先研究了近红外环形强激光束辐照下白宝石窗口温度、变形和应力的分布规律。结果表明,窗口迎光面附近单位体积吸收的平均激光束功率为 $2.5\text{W}/\text{cm}^3$,激光束内径为 0.02m ,遮拦比 $e=0.4$,光强沿 x 方向分布的空间梯度 $\gamma = 10\text{m}^{-1}$ 的环状激光束垂直通过白宝石窗口 4s 后,在迎光面窗口局部最高温升约 4C 、窗口局部最高变形约 $0.26\mu\text{m}$,窗口局部最高等效应力约 9.4MPa ,远小于其断裂强度 $\sigma_b = 0.28\text{GPa}$,不会导致窗口破坏。窗口出光面局部最高温升也约 4C ,窗口出光面沿光束方向最大伸长 $0.17\mu\text{m}$,加上迎光面的 (下转第 458 页)

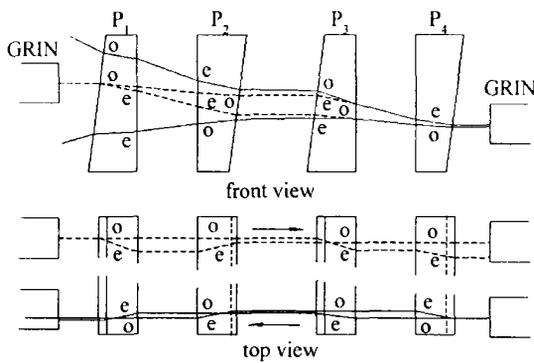


Fig 7 Light track in isolator equivalent

入射角不同所造成的误差。确定了初始界面处的三维坐标 (x_i, y_i, z_i) , 依次演算下去, 就能得到两束偏振光 (在晶体中表现为 o 光或 e 光) 在每段介质中光轨迹的五维坐标、光程差和光束的侧移距离。

3 结论

双级光隔离器中的出射光束分离程度要小得多;

就光程差而言, 如果选择合适的入射位置, 双级光隔离器可以使之为零, 而单级光隔离器光程差是无法消除的, 只有采用补偿器; 同时发现对于单级光隔离器或单个偏振片, 光束的分离以垂直方向为主, 水平方向的分离与之相比要小得多, 不在同一个数量级上; 而双级光隔离器可以有效地减小甚至消除垂直方向的侧移。这样的计算, 对于光隔离器或光环行器的工艺设计具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 龚学文, 何华辉. 两段型高性能光隔离器的设计与分析 [J]. 光通信技术, 1998, 22(3): 205~210.
- [2] 向清, 黄德修. 钽酸钷晶体楔形光隔离器 [J]. 中国激光, 1996, 23(3): 225~228.
- [3] 林学煌. 光无源器件 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1998. 147~199.
- [4] 沈为民, 邵中兴. 单轴晶体中光轴任意取向时寻常光与非寻常光间的离散 [J]. 光学学报, 2002, 22(6): 765~768.
- [5] 郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001. 322~348.

(上接第 454 页)

变形量, 窗口厚度最大总变形约 $0.43\mu\text{m}$, 相当于 0.3 倍的入射激光波长。窗口出光面局部最高应力约为 9.4MPa , 与迎光面的应力基本相同。窗口迎光面变形的均方根值为 $0.039\mu\text{m}$, 出光面变形的均方根值为 $0.036\mu\text{m}$ 。

还研究了中红外空心矩形激光束辐照下氟玻璃窗口温度、变形和应力的分布规律。窗口迎光面附近单位体积吸收的平均激光功率为 $37\text{W}/\text{cm}^3$, 光强沿 x 方向分布的空间梯度 $\gamma = 10\text{m}^{-1}$ 。结果表明, 激光出光 2s , 窗口局部最高温升约 31C 、局部最大变形约 $1.1\mu\text{m}$ 、最大等效应力约 16MPa , 也小于其 49MPa 的断裂强度。窗口出光面局部最高温升与迎光面最高温升约相等, 也为 31C ; 窗口出光面沿光束方向最大伸长 $0.8\mu\text{m}$, 加上迎光面的变形量, 窗口厚度最大总变形约 $1.9\mu\text{m}$, 相当于 0.5 倍的入射激光波长。最大等效应力也近似为 16MPa 。窗口迎光面变形的均方根值为

$0.21\mu\text{m}$, 出光面变形的均方根值为 $0.15\mu\text{m}$ 。

参考文献

- [1] MANSELL J D, HENNAW I J, GUSTAFSON E K *et al* Evaluating the effect of transmissive optic thermal lensing on laser beam quality with a Shack-Hartmann [J]. Appl Opt, 2001, 40(3): 366~374.
- [2] CLANDE A K Materials for high-power laser optics: figures of merit for thermally induced beam distortions [J]. Opt Engng, 1997, 36(6): 1586~1595.
- [3] 陈金宝, 刘泽金, 蒋志平 *et al* 非稳腔 DF 激光窗口热效应及其对远场光斑的影响 [J]. 强激光与粒子束, 1994, 6(2): 243~249.
- [4] 马毅勇, 程祖海, 张耀宇. 高功率激光与窗口热变形分析的有限元方法 [J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(1): 6~10.
- [5] 陈发良, 李有宽. 环形分布激光束引起光学窗口热变形理论分析 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 736~740.
- [6] HARRIS D C. Materials for infrared windows and domes (properties and performances) [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1999. 126~129.
- [7] 李景镇. 光学手册 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985. 1328~1337.
- [8] 竹内洋一. 热应力 [M]. 北京: 科学出版社, 1977. 47~50.