

文章编号: 0258-7025(2004)04-0412-05

在波长 1.315 μm 下的几种激光器窗口 热效应比较研究

孙 峰, 程祖海, 张耀宁, 余文峰, 周次明

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 由傅里叶瞬态导热方程和弹性体应力-应变平衡方程入手, 利用分离变量法和热弹性势法建立了晶体窗口在高能激光束照射下的瞬态温度分布、热变形和热应变分布关系式。并同时考虑温度折射率系数、厚度热变形和弹光系统的作用, 得到了波长为 1.315 μm 的平面波光束透射氟化钙、氯化钾和熔石英这三种晶体窗口时产生的近场光束相位畸变分布。通过比较发现, 窗口光束畸变是热变形、热透镜效应和弹光效应共同作用的结果, 热透镜效应占主要因素, 弹光效应可以忽略; 熔石英具有正的折射率温度系数而产生正光束畸变, 氯化钾和氟化钙为负的光束畸变, 氟化钙具有最小的相位畸变峰谷值, 优于其他二者, 适于作为 1.315 μm 波长的窗口材料使用, 氯化钾的光束畸变最严重。

关键词 激光技术; 热效应; 窗口; 光束畸变; 热透镜效应; 应力双折射; 热变形

中图分类号 TN 243; TN 248 **文献标识码** A

Thermal Distortions in Calcium Fluoride, Potassium Chloride and Fused Silica Windows at 1.315 μm

SUN Feng, CHENG Zu-hai, ZHANG Yao-ning, YU Wen-feng, ZHOU Ci-ming

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A time-dependent, two-dimensional theory is developed to calculate thermally induced stress, strain and deformations by use of separation of variables in Fourier law and thermoelastic potential method in stress-strain equilibrium equation. The beam distortion induced by thermal effects for calcium fluoride, potassium chloride and fused silica windows at 1.315 μm are deduced and analyzed. The calculations show that thermal lensing affects on beam the most among those three factors and birefringence can be neglected. Moreover, calcium fluoride window has the smallest PV value in beam phase distortions of them and potassium chloride window results in beam distortion the most badly.

Key words laser technique; thermal effects; crystal window; beam distortion; thermal lensing; strain-induced birefringence; thermal deformation

1 引 言

在连续和高重复率下运转的激光器要求窗口材料具有高的热稳定性, 以减小或者避免热效应带来的近场光束畸变和窗口本身的物理损伤^[1]。对于输出波长为 1.315 μm 的高能化学氧碘激光器(COIL)

而言, 输出窗口的热效应是激光束近场相位畸变的主要影响因素^[2]。氯化钾、氟化钙晶体和熔石英在 1.315 μm 处具有较好的机械物理性能和适宜的透射范围, 可用作窗口材料。

本文采用分离变量法和位移势法分别得到窗口的温度和热应变分布, 并考虑热透镜效应、双折射效

收稿日期: 2002-12-16; 收到修改稿日期: 2003-04-18

基金项目: 国家高技术 863 计划(410-4-8)资助课题。

作者简介: 孙 峰(1974—), 男, 华中科技大学激光技术国家重点实验室博士研究生, 主要从事高功率激光器光学元件的研究。E-mail: sunok1234@sohu.com

应和热变形的影响,建立了窗口温度、应力分布与输出光束相位畸变的关系式。根据关系式,计算了 1.315 μm 下氯化钾、氟化钙晶体窗口和熔石英窗口输出光束的相位畸变。

2 晶体窗口瞬态温度场分析

在柱坐标系下,关于 z 轴对称的瞬态热传导微分方程可以表示为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q(r, z)}{k} = \frac{\rho C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1a)$$

式中, ρ , k 和 C_p 分别为材料密度、导热系数及比热; q 为内热源项。高功率激光器一般为多模运转,设投射光斑为圆形均匀分布,光斑半径为 w_0 ; 考虑到吸收系数,则 q 可表示为

$$q(r, z, t) = \begin{cases} Q_0 e^{-\alpha z} & 0 \leq r \leq w_0, t \geq 0 \\ 0 & w_0 < r \leq r_0, t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1b)$$

式中, $Q_0 = \frac{P}{\pi w_0^2}$, P 为吸收功率, α 为吸收系数, r_0 为

窗口半径。

设窗口初始温度与大气温度相同。由于光腔内压力极低,并且激光器窗口担负密封光腔和输出光束的功能,因此窗口朝向光腔的端面可认为与腔内环境没有对流换热,即处于绝热状态;窗口另外一侧端面与环境温度为 T_∞ 的大气接触,对流换热系数为 h 。则初始条件和边界条件表示为

$$\begin{cases} T = T_\infty, & t = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial r} = 0, & r = r_0 \\ \frac{\partial T}{\partial z} = 0, & z = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial z} + H(T - T_\infty) = 0, & z = l \end{cases} \quad (1c)$$

式中, $H = h/k$, l 为晶体窗口厚度。

针对渗透源的吸收呈指数分布,定义一个变量 $\Psi(r, z, t)$, 令

$$T(r, z, t) - T_\infty = \Psi(r, z, t) - \frac{Q_0}{\alpha^2 k} e^{-\alpha z} - \frac{Q_0}{\alpha k} z \quad (2)$$

把(2)式代入(1)式,得到

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \Psi}{\partial t} \\ \Psi = \frac{Q_0}{\alpha^2 k} e^{-\alpha z} + \frac{Q_0}{\alpha k} z, & t = 0 \\ \frac{\partial \Psi}{\partial r} = 0 & r = r_0, t > 0 \\ \frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0 & z = 0, t > 0 \\ \frac{\partial \Psi}{\partial z} + H\Psi + \frac{Q_0}{\alpha k} (e^{-\alpha l} - Hl - \frac{H}{\alpha} e^{-\alpha l} - 1) = 0 & z = l, t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

这样,非齐次方程(1)就变为齐次方程。对(3)式采用分离变量法,可得到温度场 $T(r, z, t)$

$$T(r, z, t) = \frac{Q_0}{\alpha k} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{c_{mp} [1 + (H/\alpha - 1)e^{-\alpha l} + Hl]}{(H - \beta_m) e^{-\beta_m l} + (H + \beta_m) e^{\beta_m l}} (e^{-\beta_m z} + e^{\beta_m z}) J_0(\beta_m r) e^{\alpha(\eta_p^2 - \beta_m^2)t} - \frac{Q_0}{\alpha^2 k} e^{-\alpha z} - \frac{Q_0}{\alpha k} z + T_\infty \quad (4)$$

式中系数 c_{mp}

$$c_{mp} = \frac{Q_0}{\alpha^2 k} \cdot \frac{1}{N(\beta_m) N(\eta_p)} \int_0^{r_0} \int_0^l r z (\eta_p z) J_0(\beta_m r) e^{-\alpha z} + \alpha z \, dr dz \quad (5)$$

对于晶体窗口的热应力和热变形,采用热弹性位移势法。关于热弹性位移势 Φ 的泊松型微分方程为

$$\Delta \Phi = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \alpha_T T(r, z, t) \quad (6)$$

式中 $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, ν 为泊松比, α_T 为热膨胀系数。容易得到 Φ 的特解

$$\begin{aligned} \Phi(r, z, t) = & \frac{Q_0 \alpha_T (1 + \nu)}{\alpha^2 k (1 - \nu)} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{c_{mp}}{\beta_m} \cdot \frac{1 + (H/\alpha - 1)e^{-\alpha l} + Hl}{(H - \eta_p) e^{-\eta_p l} + (H + \eta_p) e^{\eta_p l}} (e^{-\eta_p z} + e^{\eta_p z}) J_0(\beta_m r) e^{\alpha(\eta_p^2 - \beta_m^2)t} - \\ & \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{Q_0 \alpha_T}{\alpha^4 k} e^{-\alpha z} - \frac{Q_0 \alpha_T (1 + \nu)}{6k\alpha (1 - \nu)} z^3 + \frac{\alpha_T T_\infty (1 + \nu)}{2(1 - \nu)} z^2 \end{aligned} \quad (7)$$

则根据热弹性位移势 $\Phi(r, z)^{[3]}$, 容易求得晶体窗口的变形分量 u_r 和 u_z 及应变分量 ϵ_r 和 ϵ_z 。

3 热致光束相位畸变分析

窗口吸收热量使温度上升并产生变形和热应力, 由于存在温度折射率系数和弹光系数的影响, 折射率成为温度和应变的函数。现在假设一束平面波光束沿 z 轴正向传播, 如图 1 所示。

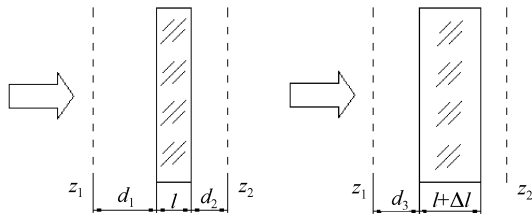


图 1 晶体窗口热效应示意图

Fig. 1 Schematic of thermal effects on crystal window

令 z_1 和 z_2 分别为晶体窗口入射光一侧某处和出射光一侧某处的参考面。光束通过热变形的晶体窗口, 1 和 2 参考面处的相位差有

$$\Delta\varphi_{\text{distort}} = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \left[d_1 + d_2 - \Delta l + \int_{d_3}^{d_3+l+\Delta l} n(T, \epsilon_{ij}) dz \right] \quad (8)$$

式中, Δl 为厚度的热变形量, $n(T, \epsilon_{ij})$ 表示折射率 n 是温度 T 和应变分量 ϵ_{ij} 的函数。考虑温度折射率系数和应变弹光系数的作用, 则能够得到输出光束相位畸变 $\Delta\varphi$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \Delta\varphi_{\text{distort}} - \Delta\varphi_{\text{undistort}} = \\ &= \Delta\varphi_{\Delta l} + \Delta\varphi_{\Delta T} + \Delta\varphi_{\Delta\epsilon} = \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \left[\Delta l(n_0 - 1) + \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^l T dz + \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial n}{\partial \epsilon_{ij}} \int_0^l \epsilon_{ij} dz \right] \quad (9) \end{aligned}$$

式中, n_0 为常温下的晶体折射率, $\partial n / \partial T$ 为温度折射率系数, $\partial n / \partial \epsilon_{ij}$ 为应变弹光系数。由上式看出, 相位畸变由三项组成: 第一项代表晶体窗口沿轴向的几何膨胀导致的像差, 第二项表示温度折射率系数的影响, 即热透镜效应, 第三项是应力双折射效应对相位的作用。由于 $\Delta l = u_z(r, l) - u_z(r, 0)$, (9) 式中的 Δl 和 ϵ_{ij} 可从前面热应力分析得到。

氯化钾和氟化钙单晶都属于立方晶系中的 $T_d - m3m$ 晶类, 对这一类晶体, 沿立方体的轴施加单向应力, 光率体就会由球体变为旋转椭球体, 晶体变成单轴晶。而熔石英为均质材料, 具有比立方晶体更高的对称性。根据折射率与应变分量关系式^[4,5], 能够得到柱坐标下这三种材料的应变弹光系数。由于存在径向和切向的折射率分布, 导致输出光束产生径向和切向相位畸变, 因此有

$$\begin{cases} \Delta\varphi_r = \Delta\varphi_{\Delta l} + \Delta\varphi_{\Delta T} + \Delta\varphi_{\Delta\epsilon, r} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\Delta l(n_0 - 1) + \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^l T dz + \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial n_r}{\partial \epsilon_{ij}} \int_0^l \epsilon_{ij} dz \right] \\ \Delta\varphi_\theta = \Delta\varphi_{\Delta l} + \Delta\varphi_{\Delta T} + \Delta\varphi_{\Delta\epsilon, \theta} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\Delta l(n_0 - 1) + \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^l T dz + \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial n_\theta}{\partial \epsilon_{ij}} \int_0^l \epsilon_{ij} dz \right] \end{cases} \quad (10)$$

表 1 CaF₂, KCl 和熔石英的物理性质

Table 1 Properties of CaF₂, KCl and fused silica

Property	CaF ₂	KCl	Fused silica
Space group	<i>Fm3m</i>	<i>Fm3m</i>	Amorphous
Density / (kg/m ³)	3181	1987	2648
Specific heat / (J/kg · K ⁻¹)	911.3	693.6	746
Thermal conductivity / (W/m · K ⁻¹)	9.7	6.7	1.38
Thermal expansion coefficient / (×10 ⁻⁶ K ⁻¹)	18.9	36.5	0.51
Young's modulus / GPa	110	22	72.6
Poisson's ratio	0.29	0.29	0.16
Absorption coefficient / (×10 ⁻³ cm ⁻¹)	0.176	0.183	0.19
Refractive index	1.527	1.475	1.447
Thermal refractive index coefficient / (×10 ⁻⁶ K ⁻¹)	-10.18	-36.2	10.3

4 计算结果

表 1 列出了氟化钙、氯化钾晶体和熔石英的各

种物理光学性质^[5,6]。根据前面的分析公式, 计算了均匀激光束通过这三种窗口在第 5 s 时刻产生的

温度变化、厚度热变形及光束相位畸变。计算中，窗口厚度为 15 mm，直径为 80 mm；净吸收功率为 100 W，光斑直径为 40 mm；窗口与周围环境对流换热系数为 $5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$ ，环境温度为 20°C 。

图 2 是三种窗口的温度分布等高线。可以看到，当吸收相同热量时，熔石英升温最高，最高温度达到 140°C ，氯化钾次之，氟化钙最低，而且熔石英的温度梯度明显最大。这个结果与三者导热系数的比较顺序正好相反，说明导热系数直接决定着窗口温升，也同时说明氟化钙窗口具有较好的导热性能。另外，三者沿径向温度变化都不显著，这与在光照区域光强均匀分布有关。

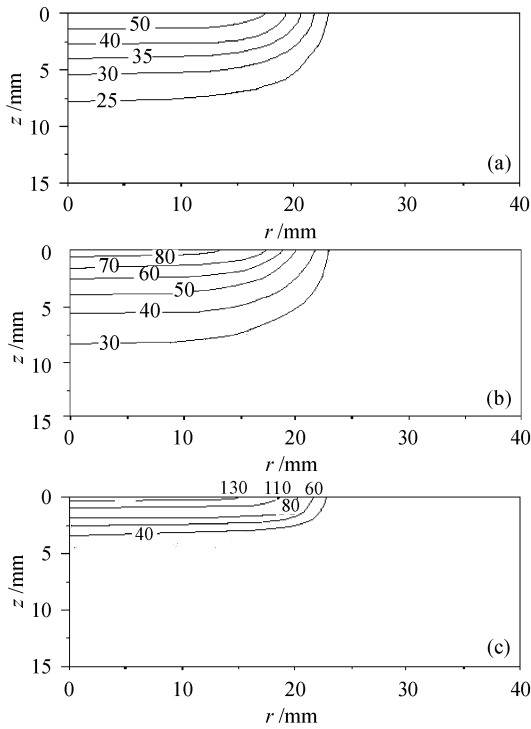


图 2 CaF₂ (a), KCl (b) 和熔石英 (c) 的温度分布等高图 (单位: $^\circ\text{C}$)

Fig. 2 Contours of temperature for CaF₂ (a), KCl (b) and fused silica (c) (unit: $^\circ\text{C}$)

图 3 分别计算了三种透射窗口的热变形畸变 $\Delta\varphi_{\Delta l}$ ，热透镜畸变 $\Delta\varphi_{tl}$ 和弹光效应畸变 $\Delta\varphi_{\Delta\epsilon}$ ，其中 $\Delta\varphi_{\Delta\epsilon}$ 是径向畸变 $\Delta\varphi_{\Delta\epsilon,r}$ 与切向畸变 $\Delta\varphi_{\Delta\epsilon,\theta}$ 的平均值。结果显示，三种材料热透镜畸变都远大于其他两种效应，弹光效应畸变非常微弱，其影响可以不予考虑。另外，热变形畸变和弹光效应畸变都为正值，而由于熔石英的折射率具有正温度系数，使其热透镜效应产生正的光束畸变，另外两种材料都为负畸变。

图 4 是光束透射窗口时的总相位畸变 $\Delta\varphi$ 比较，

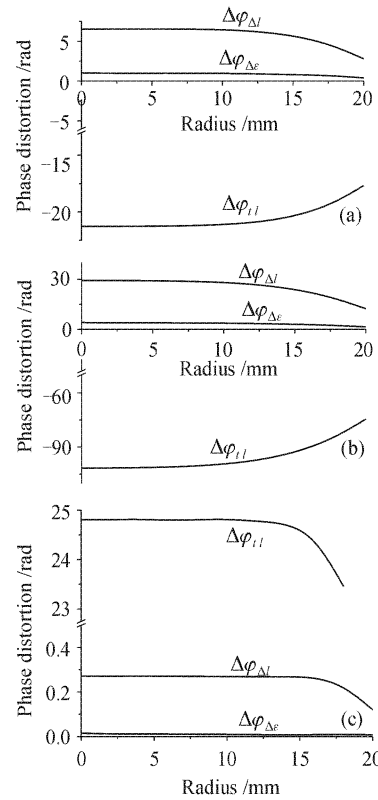


图 3 三种窗口的相位畸变分量 $\Delta\varphi_{\Delta l}$ ， $\Delta\varphi_{tl}$ 和 $\Delta\varphi_{\Delta\epsilon}$ 沿径向分布曲线

(a) CaF₂; (b) KCl; (c) 熔石英
Fig. 3 Phase distortion components $\Delta\varphi_{\Delta l}$ ， $\Delta\varphi_{tl}$ and $\Delta\varphi_{\Delta\epsilon}$ versus radius

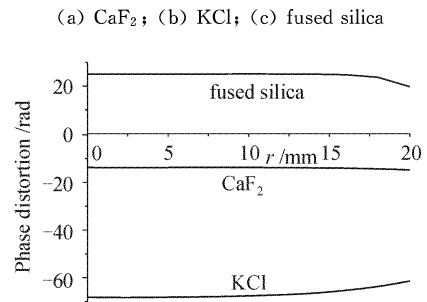


图 4 总相位畸变 $\Delta\varphi$ 沿径向分布曲线

Fig. 4 Total phase distortion $\Delta\varphi$ versus radius

它是 $\Delta\varphi_r$ 和 $\Delta\varphi_\theta$ 的平均值，与总光程差成正比。显然，只有熔石英的相位畸变为正值，其他二者都为负值，熔石英和氯化钾的相位畸变随半径增大而缓慢减小，氟化钙则是中心处的畸变略小于光斑边缘处，其峰谷值为 0.1 rad，其相位畸变约为 -14 rad 。从结果判断，氟化钙窗口的相位畸变峰谷值最小，波阵面沿半径变化最小，优于熔石英和氯化钾窗口，氯化钾窗口光束畸变最严重。

5 结 论

对光束投射晶体窗口时热效应导致的光束相位畸变做了理论推导,通过计算比较了氟化钙、氯化钾和熔石英三种窗口的温升和光束相位畸变。得出结论:1) 温升决定于材料导热系数,熔石英温升最大; 2) 窗口光束畸变是热变形、热透镜效应和弹光效应共同作用的结果,热透镜效应占主要因素,弹光效应可以忽略;3) 熔石英具有正的折射率温度系数而产生正光束畸变,氯化钾和氟化钙为负的光束畸变,氟化钙的畸变最小且其峰谷值也最小,适于作为 $1.315\ \mu\text{m}$ 波长的窗口材料使用,氯化钾的光束畸变最严重。

参 考 文 献

- 1 C. A. Klein. Optical distortion coefficients of high-power laser windows [J]. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(4):343~350
- 2 Li Zaiguang, Cheng Zuhai, He Xuhui. Investigation on output beam of positive-branch confocal unstable resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 1985, **12**(8):459~464
李再光,程祖海,何煦辉. 正支共焦非稳腔输出光束质量的研究 [J]. *中国激光*, 1985, **12**(8):459~464
- 3 Wang Honggang. Introduction of Thermo-elasticity [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989
王洪钢. 热弹性力学概论[M]. 北京:清华大学出版社,1989
- 4 W. Koechner, D. K. Rice. Effect of birefringence on the performance of linearly polarized YAG:Nd lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1970, **QE-6**(9):557~566
- 5 Solomon Musikant. Optical Materials [M]. New York, Marcel Dekker, Inc., 1985
- 6 Ronald W. Waynant, Marwood N. Ediger. Electro-optics Handbook [M]. New York, McGraw-Hill, Inc., 1994. 11