

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0492-03

化学氧碘激光器光学基片材料的光致热畸变特性

彭玉峰¹, 程祖海², 盛朝霞¹, 余文峰², 张虎¹, 周次明²

(¹河南师范大学物理与信息工程学院, 河南 新乡 453002; ²华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 利用格林函数解析法对强激光辐照下的光学材料 Al_2O_3 、 CaF_2 、 Si 、 SiO_2 四种基片的温度场分布以及热畸变特性进行了分析与讨论。计算结果表明:在 10 kW 激光功率、辐照时间为 5 s 情况下, Al_2O_3 、 CaF_2 、 Si 、 SiO_2 基片中心处最大温升分别为 5.6 °C、6.0 °C、35.1 °C、26.6 °C;基片中心最大热畸变量分别为:0.28 μm 、0.99 μm 、0.40 μm 、0.14 μm 。

关键词 光电子学与激光技术;化学氧碘激光器;窗口材料;热畸变

中图分类号 TN248.5

文献标识码 A

Characteristics of Thermal Distortions of Optical Substrate Surfaces Subject to Irradiation of Chemical Oxygen-Iodine Laser

PENG Yu-feng¹, CHENG Zu-hai², SHENG Zhao-xia¹, YU Wen-feng²
ZHANG Hu¹, ZHOU Ci-ming²

(¹ College of Physics and Information, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453002, China)
(² The State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Temperature distributions and thermal deformations of silicon, sapphire, and calcium fluoride window substrates at 1.315 μm are calculated in terms of Green-function methods. The calculated results show that under conditions of irradiating of 10kW intense laser with Gaussian shape, the maximum temperature rise in Al_2O_3 , CaF_2 , Si , and SiO_2 substrates is 5.6 °C, 6.0 °C, 35.1 °C, and 26.6 °C, respectively. The amount of thermal distortions in Al_2O_3 , CaF_2 , Si , and SiO_2 substrates is 0.28 μm , 0.99 μm , 0.40 μm , and 0.14 μm , respectively.

Key words optoelectronics and laser technology; chemical oxygen-iodine laser; window material; thermal distortion.

1 引言

光连续激光对光学元件的破坏以及激光引起的热畸变是高能化学激光器工作中经常遇到的重要问题。对于高功率激光器而言,光学元件因吸收激光能量而引起的温升将会产生热畸变和内部应力,降低光学系统的光束传输性能。更确切地说,如果热畸变量大于 $\lambda/10$ 或达到 $\lambda/10$ 至 $\lambda/4$, 输出激光的光束质量就会相当差,在较小发散角范围内的输出激光能量将会明显降低。

20世纪 80 年代初期,美国就十分重视强激光

辐照下光学材料的性能研究,其中美国空军武器装备实验室、美国空军材料实验室等曾投入较大的人力物力,研究性能优良的匹配化学氧碘激光器 1.315 μm 激光波长的窗口材料。涉及的材料范围广泛,具体包括 NaCl 、 KCl 、 LiF 、 CaF_2 、 SrF_2 、 Al_2O_3 、 ZnSe 、 Si 、 SiO_2 、 BaF_2 、GGG ($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$), 以及其它一些玻璃材料等。

本文针对目前比较流行的几种光学材料,重点分析了在波长为 1.315 μm 的激光照射情况下 Al_2O_3 、 CaF_2 、 Si 、 SiO_2 四种基片的温度场分布以及热畸变特性。

基金项目: 国家“863”计划、国家自然科学基金(69878008)资助课题。

作者简介: 彭玉峰(1963-),河南师范大学教授,博士,主要从事高能激光器件、激光与物质相互作用研究。

Email: yufengp@henannu.edu.cn

2 理论基础

2.1 温度场分布

图 1 为热传导问题分析简图。激光束沿 z 轴方

向入射,窗口介质的厚度为 d ,半径为 b 。若介质的热扩散系数为 α ,热导率为 κ ,则介质内的温度分布由热传导方程表示如下^[1]

$$\frac{\partial^2 T'(r,z,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T'(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\partial T'(r,z,t)}{\partial z^2} + \frac{1}{\kappa} g(r,z) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T'(r,z,t)}{\partial t} \quad (0 \leq r < b, 0 < z < d, t > 0) \quad (1)$$

其中, T' 为介质内温升; $g(r,z)$ 代表内热源强度,若入射激光强度为高斯分布,则内热源强度可表示为

$$g(r,z) = \frac{2P}{\pi\omega^2} \mu \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2} - \mu z\right) \quad (2)$$

其中, μ 为吸收系数, P 为入射激光总功率, ω 为光斑半径。采用格林函数解析法,可以得到热传导方程(1)的解为^[2]

$$T'(r,z,t) = \frac{\alpha}{\kappa} \int_{r'=0}^b \int_{z'=0}^d \int_{\tau=0}^t \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \frac{\exp[-\alpha(\beta_m^2 + \eta_p^2)(t-\tau)]}{N(\beta_m)N(\eta_p)} R_0(\beta_m r) Z(\eta_p z) \times R_0(\beta_m r') Z(\eta_p z') g(r', z') r' dr' dz' d\tau \quad (3)$$

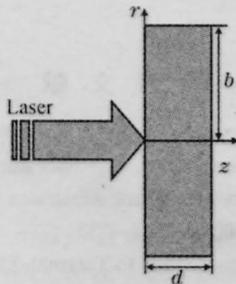


图 1 热传导问题分析简图

Fig.1 Schematic diagram of heat conduction calculation

式中, $R_0(\beta_m, r)$, $Z(\eta_p, z)$ 为本征函数, $N(\beta_m)$ 和 β_m 分别为 $R_0(\beta_m, r)$ 的范数和 本征值; $N(\eta_p)$ 和 η_p 分别为 $Z(\eta_p, z)$ 的范数和 本征值。

为方便起见,我们假定光学基片材料的厚度 d 为 0.01 m, 半径 b 为 0.025 m。入射激光强度呈高斯

分布,其光斑半径为 0.01 m。基片边界与周围环境自由换热,换热系数 h 为 5 W/m^2 。

假定激光辐照时间为 5 s, 入射激光功率分别为 5 kW 和 10 kW, 根据温升表示式(4)可以计算出 Al_2O_3 , CaF_2 , Si , SiO_2 四种基片的温升沿径向距离的分布,分别如图 2(a)~(d)所示。

2.2 基片的热变形

在自由边界情况下,基片的轴向(z 轴)热变形 Δd 由两部分组成^[3]: (a) 轴向的自由热膨胀 Δd_f ; (b) 轴向温度分布的不均匀产生的热弹性位移 Δd_t 。即,

$$\Delta d = \Delta d_f + \Delta d_t \quad (4)$$

这里, $\Delta d_f = \alpha_l \int T'(r,z,t) dz$, α_l 是热膨胀系数。 Δd_t 需要算出满足边界条件的热应力后,通过应力应变本

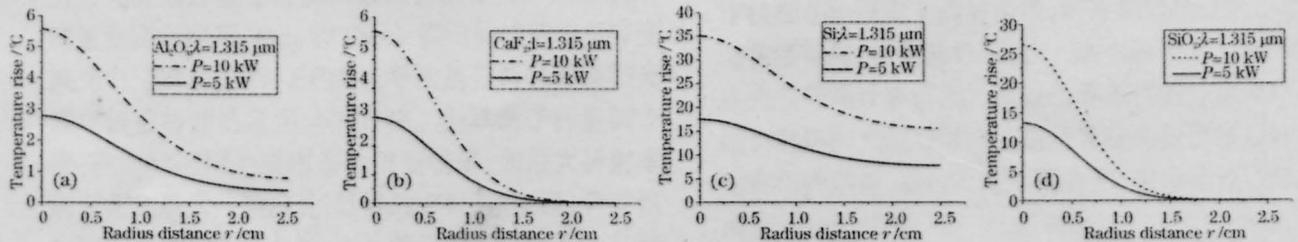


图 2 基片表面温升与径向距离的关系曲线

Fig. 2 Temperature rise on the substrate surfaces versus radial distance

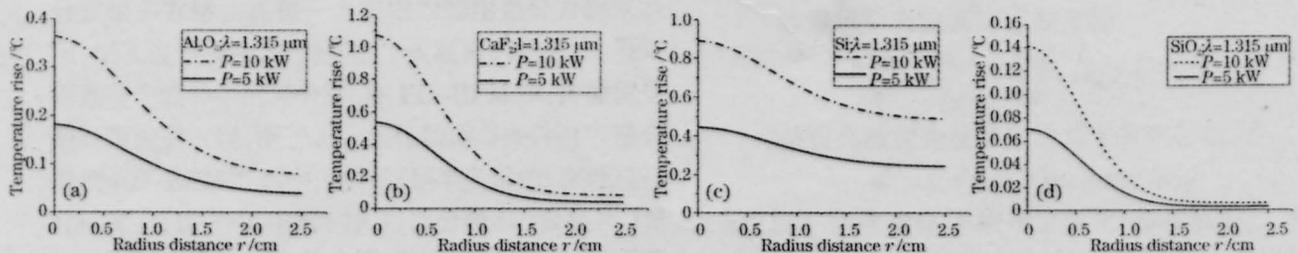


图 3 基片热变形的径向分布

Fig. 3 Thermal deformations of the substrates versus radial distance

表 1 基片中心热变形和激光照射时间的关系

Table 1 Thermal deformations of the substrates versus irradiating time

Irradiating time /s		0	2	4	6	8	10
Thermal deformation / μm	Al_2O_3	0	0.265	0.338	0.386	0.428	0.469
	CaF_2	0	0.558	0.928	1.202	1.418	1.594
	Si	0	0.291	0.787	0.991	1.194	1.397
	SiO_2	0	0.064	0.118	0.163	0.203	0.238

构关系来得到。

在上述给定条件下,可以计算出 Al_2O_3 , CaF_2 , Si, SiO_2 四种基片的热变形沿基片表面径向的空间分布,分别如图 3(a)~(d)所示。基片中心热变形随激光照射时间的变化具体数据如表 1 所示。

3 分析与讨论

由表 1 可以看出,当入射激光功率为 10 kW 时,照射时间为 4 s 时, Al_2O_3 , CaF_2 , Si, SiO_2 四种基片的中心处热变形分别为 0.338 μm , 0.928 μm , 0.787 μm , 0.118 μm ; 基片中心热变形增幅由小到大依次是 SiO_2 , Al_2O_3 , Si, CaF_2 。比较分析发现: SiO_2 ,

Al_2O_3 是比较理想的化学氧碘激光器窗口材料。具体特点是:在一定入射激光功率下,虽然 SiO_2 基片局部温升较高,但其热畸变量较小,因此对光束质量的影响较小。而 Al_2O_3 基片温升较小,其热变形也比较小。

参 考 文 献

- 1 M. N. Özışık. *Heat conduction*. New York: Wiley, 1980
- 2 Peng Yufeng, Cheng Zuhai. Temperature distributions and thermal deformations of mirror substrates in laser resonators. *Appl. Opt.*, 2001, 40(27):4824~4830
- 3 Wang Honggang. *Introduction to Thermal-Elastic Mechanics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989
王洪刚. 热弹性力学概论[M]. 北京:清华大学出版社, 1989