

K9 玻璃表面的 1064nm 激光损伤

胡建平, 张问辉, 段利华, 马平, 许乔

(成都精密光学工程研究中心, 成都 610041)

摘要: K9 玻璃是一种性能优异的光学材料, 作为激光薄膜的基底, 其抗激光损伤的特性和能力, 直接影响高功率激光薄膜的性能, 特别是对激光增透、偏振膜。本文采用 10ns 的 1064nm 激光, 实验研究了 K9 玻璃前后的激光损伤特性, 用 Nomaski 显微镜分析损伤图貌, 结果显示玻璃前后表面的激光损伤表现不同, 前表面主要表现为烧伤, 后表面主要表现为破斑, 前后表面的损伤阈值之比约为 1.4。后表面的损伤形貌与前表面相比, 基本为灾难性损伤, 多次激光脉冲打击显示, 后表面的激光损伤尺度随着激光脉冲数呈指数增长。

关键词: K9 玻璃表面; 激光损伤

中图分类号: TN24; O484.4

文献标识码: A

文章编号: 1023-2743(2006)03-0059-02

The surface damage induced by 1064nm laser on K9 glass

HU Jian-ping, ZHANG Wen-hui, DUAN Li-hua, MA Ping, XU Qiao

(Chengdu Fine Optic Engineer Research center, Chengdu 610064, China)

Abstract: As the substrate of laser coatings, the laser damage characteristics of K9 glass can directly influence on the performances of laser coatings such as AR and polarizer. In this paper, the damage of glass has been studied by use of a 1064nm longitude mode, 10 ns Nd:YAG laser, the laser damage size and morphology are observed and analyzed by using a Nomaski microscope, the results show that there is obviously different for characterization and threshold of laser damage between front and back surface, the damage threshold of back surface is 1.4 times lower than that of front, and the crack damage is more serious than scald damage on front surface. In addition, the damage size of back surface show exponential growth with laser shot numbers.

Key words: K9 glass, surface damage.

1 引言

激光薄膜的基体材料对薄膜的激光损伤阈值有极大的影响, 不同的基体材料具有不同的结构、膨胀系数、应力和热传导特性, 一定程度决定薄膜的品质特性, 特别是抗激光损伤特性^[1-3]。K9 光学玻璃作为高功率激光器重要的光学元件, 其性能的好坏直接关系到激光器功率输出的大小和光束质量, K9 玻璃还是高功率激光薄膜的常用基片, 它的损伤特性直接影响激光薄膜的抗激光损伤能力, 特别是增透膜偏振膜等, 因此研究 K9 玻璃表面的激光损伤特性, 对于理解激光光学薄膜, 特别是透射光学薄膜如增透、偏振等具有重要意义。

本文对 K9 玻璃前后表面的激光损伤特性进行了研究, 实验结果显示 K9 玻璃前后表面的激光损伤特性有区别, 前表面主要表现为烧伤, 后表面主要表现为破斑, 前后表面的损伤阈值之比约为 1.4。后表面的损伤形貌与前表面相比, 基本为灾难性损伤, 多次激光脉冲打击显示, 后表面的激光损伤尺度随着激光脉冲数呈指数增长。

2 试验样品及方法

K9 玻璃样片尺寸为 $\phi 50 \times 8\text{mm}$, 表面粗糙度均方根小于 1nm, 样片两面抛光。激光损伤实验装置由单纵膜 Nd:YAG 调 Q 激光器, He-Ne 准直光源, 分光光楔, 3m 聚焦凸镜, 可移动样品平台, 能量计和 CCD 光束分析仪组成。测试激光由 Nd:YAG 调 Q 脉冲激光器输出, 激光输出模式 TEM₀₀, 波长 1064nm, 脉宽 (FWHM) 为 10ns, 最大脉冲能量 1.5 焦耳, 能量稳定度为 $\pm 5\%$ 。样品平台可 X-Y-Z 三方向移动和水平面旋转, 能保证测试光斑在样品不同区域和以偏振角 56.5 度进行激光损伤测试。激光能量用美国 EM500 大能量探头能量计测量, 测量精度约 $\pm 1\%$, 测试点光斑的有效面积用 CCD 光束分析仪测量, 测得光斑平均

等效面积为 0.66mm^2 。

样片的激光损伤采用 1-on-1 和 N-on-1 方式, 即单脉冲激光损伤和多脉冲激光损伤, 激光损伤的判定主要依靠激光引起的等离子体闪光和 Nomaski 显微镜, 并由显微镜分析激光损伤的图貌和特性。

3 实验结果及分析

3.1 玻璃表面的激光损伤特性

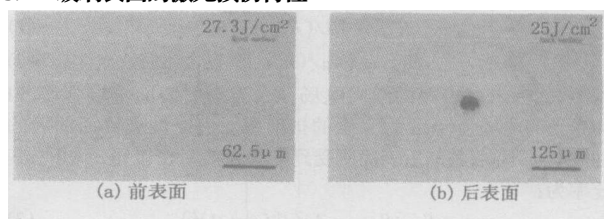


图 1 K9 玻璃表面的单次激光损伤图貌

K9 玻璃的激光损伤分前表面和后表面, 前表面为激光入射面, 后表面为激光出射面。前后表面典型的 1-on-1 激光损伤如图 1 所示, 可以看出, 前表面的激光损伤表现为圆形疤痕, 为玻璃界面物质高温熔化和汽化后形成的坑, 坑中有许多麻点, 尺寸大小为 $2-5\mu\text{m}$ 左右, 并且尺寸大小不随激光能量的增大而变化, 初步认为是玻璃抛光时残留下的抛光粉的激光损伤所致, 有的前表面激光损伤没有麻点, 激光损伤能量较高。前表面的损伤均要伴随着激光等离子体闪光出现, 等离子体闪光的强弱与激光能量大小有关, 激光强, 则闪光也强, 但激光损伤形貌相同, 只是损伤面的尺寸增大而已。后表面的激光损伤与前表面相比, 有一些特点, 激光损伤为破斑, 即玻璃界面发生崩裂, 形成孔洞。图 2 是后表面激光损伤的 wyko 干涉仪所成的二维截面图, 激光损伤孔洞深入界面 600nm, 可以看出后表面的激光损伤是从介质内的亚表面层开始。

收稿日期: 2005-04-05

玻璃的激光连续多脉冲 N-on-1 方式打击,前后表面如在第一次激光脉冲发生损伤,则后续的激光对前表面损伤的发展作用不大,可后表面的激光损伤面呈快速指数增长方式,如图 3 所示,第一激光脉冲引起后表面界面的微小损伤,尽管损伤尺寸小到 $10\mu\text{m}$ 左右,但此损伤点为后续激光脉冲的激光损伤增长源,激光损伤面为指数增长,经过 5 至 6 个激光脉冲后,后表面的激光损伤表现为灾难性的碎斑,如图 3 所示。因而后表面的抗激光损伤能力对玻璃的整体抗激光损伤能力起主要作用。

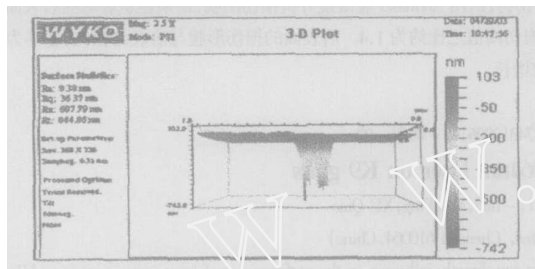


图 2 玻璃后表面激光损伤截面形貌

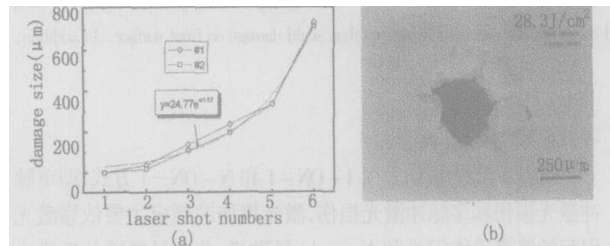


图 3 玻璃后表面 N-on-1 的激光损伤

3.2 玻璃表面激光损伤分析

玻璃表面的激光损伤主要由激光产生的电场引起,激光电场会在介质表面和介质内形成驻波场,入射场和出射场为^[4]

$$E_{\text{ent}} = \frac{2}{(n+1)} E_i \quad (1)$$

$$E_{\text{exit}} = \frac{4n}{(n+1)^2} E_i \quad (2)$$

其中 E_{ent} 为入射表面的激光电场, E_{exit} 为出射表面电场强度, E_i 为激光的电场强度, n 为介质的折射率。由于玻璃界面前后的驻波电场不同,其前后表面所受到的激光能量密度也不相同,其比率为:

$$S_{\text{ent}}/S_{\text{exit}} = 4n^2/(n+1)^2 \quad (3)$$

当 $n=1.52$ 时, $S_{\text{ent}}/S_{\text{exit}}=1.5$ 左右,从电场分布的角度,可以说明前表面比后表面的激光损伤阈值高 1.5 倍,实验结果也证实前后表面的激光损伤阈值相差 1.5 倍左右,我们实验测得的 K9 前表面的损伤阈值为 $26.8\text{J}/\text{cm}^2$,后表面为 $18.3\text{J}/\text{cm}^2$,前后之比为 1.46,与理论较为符合,说明玻璃前后表面损伤主要由激光驻波场引起。

由于激光的入射方向,入射面的最大电场位于界面的空气侧,而出射电场则在界面的介质内,由于电场分布位置不同,造成前后表面激光损伤形态的差异。入射激光作用于介质表面及亚表层,其电场与介质表面缺陷相互作用,缺陷吸收激光能量而形成高温等离子体,激光等离子体形成的高温及激波在空气中得以释放,对玻璃界面的损伤只是烧伤。在等离子体形成后,其电场强度由下列公式给出:

$$E_{\text{ent}}/E_i = 2n_p/(n_p+1) \quad (4)$$

其中 $n_p = (1 - w_p/w^2)^{1/2}$, 为等离子体折射率, w_p 为等离子

体频率,约为 $3.6 \times 10^9 N_e$ 为等离子体中的电子密度, w 为激光角频率,当 $w_p = w$ 时,即 $N_e > N_c$, $E_{\text{ent}} = 0$ 。可以看出等离子体对激光有屏蔽作用,当等离子体密度达到一定临界点时,激光能量对深入介质亚表面的缺陷没有作用。另外,用高能量密度的激光打击玻璃时,发现后表面的损伤比低能量的激光损伤轻微,如图 5 所示,激光能量高达 $120\text{J}/\text{cm}^2$,而后表面损伤程度比 $25\text{J}/\text{cm}^2$ 的能量激光损伤低,处于发生破斑损伤的临界点。

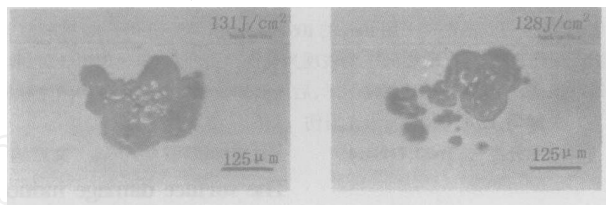


图 5 高激光能量密度时后表面激光损伤

因为强激光能量首先作用于前表面产生高密度等离子体,其入射到介质的激光能量就小,因而,后表面激光损伤较轻微,没有产生表面崩裂现象。

出射激光的驻波场在介质内,与界面亚表层中的缺陷相互作用,形成等离子体,由于在介质内,高温及其产生的应力形变,易使界面介质崩落,而形成破斑状的损伤形态。当后表面形成等离子体时,其电场分布为:

$$E_{\text{exit}} = 2nE_i/(n_p+1) \quad (5)$$

当 $n_e > n_c$ 时, $E_{\text{exit}} = 2E_i$,若激光脉冲引起界面微小损伤时,伴随着等离子体火花,其等离子体密度较小,而后续激光脉冲所引起的激光等离子体密度逐渐增大,电场也就增强,电场增强又会引起损伤增大,因而损伤面增大的速率一次比一次人,呈指数增长。

4 结论

通过上述实验及结果分析,可知 K9 玻璃前后表面的激光损伤主要由激光形成的驻波场引起,其形态表现不一样,前表面主要表现为疤痕,为玻璃界面物质高温溶化和汽化后形成的坑,坑中有许多麻点,尺寸大小为 $2-3\mu\text{m}$ 左右,并且尺寸大小不随激光能量的增大而变化,可能是玻璃抛光时残留下的抛光粉的激光损伤所致。后表面则主要表现为破斑,损伤形态较为严重,玻璃的激光连续多脉冲 N-on-1 方式打击,前后表面如在第一次激光脉冲发生损伤,则后续的激光对前表面损伤的发展作用不大,可后表面的激光损伤面呈快速指数增长方式,经过 5 至 6 个激光脉冲后,后表面的激光损伤表现为灾难性的碎斑。因而,对于 K9 玻璃,其激光损伤能力主要由后表面决定,并且比前表面的激光损伤阈值低 1.5 倍左右。

参考文献

- [1] R. W. Hopper and D. R. Uhlmann, Mechanism of Inclusion Damage in Laser Glass [J]. Journal of Applied Physics, 1970, 41 (10): 4023-4037.
- [2] M. A. Norton, L. W. Hrubesh, Z. Wu, E. E. Donohue, M. D. Feit, etc. Growth of Laser Initiated Damage in Fused Silica at 351nm [R]. UCRL - JC - 139624, 2001.
- [3] Genin F. Y., Kozłowski M. R., Brusasco R., Catastrophic Failure of Contaminated Fused Silica Optics at 355nm [R]. UCRL - JC - 125417, 1996.