

2 ns 大口径高功率激光对光学玻璃 材料破坏研究*

陈 飞 孟绍贤

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理实验室, 上海 201800)

摘 要 报道了应用诺曼斯基(Nomarski)偏振光干涉仪测量 K_s 玻璃和掺钕硅酸盐玻璃材料在高功率大口径激光照射后破坏阈值, 并分析了破坏机理。发现在纳秒脉冲激光作用下, 破坏的主要机制是受激布里渊散射激发超声波引起的材料破坏。

关键词 破坏, 诺曼斯基偏振光干涉仪, 受激布里渊散射, 大口径高功率激光。

1 引 言

过去的破坏实验, 大都是在小型激光器上通过紧聚焦打靶进行的, 光斑尺寸的确定误差较大。而且由于小尺度自聚焦的影响, 使得焦面上的激光能量分布无法精确估算, 实际测量也十分困难, 从而导致实验结果在很大程度上无规性和不可靠性。近年来随着高功率大口径激光器件的发展, 劳仑茨·利弗莫尔实验室等开始直接使用大口径激光做破坏实验, 所得到的实验结果可靠得多。严格可靠的实验结果对于我国的神光 II 号和 III 号工程是十分重要的, 因此, 作者利用新建成的两路高功率大口径激光系统的一路进行了 K_s 玻璃和掺钕硅酸盐玻璃等光学材料的破坏实验研究, 得到了一些有益的结果。这些结果对于进一步理解光学材料的激光破坏过程和破坏机制, 以及改善光学材料的制备与应用都有一定的指导作用。

2 理论分析

材料在外界强光照射情况下, 介质内的带电粒子(如离子)将发生移动, 从而引起介质内部的附加应力作用, 即电致伸缩效应; 反过来, 由于带电粒子在外界电场作用下产生弹性力学运动(即声波), 必然引起介质电极化特性——介电常数的变化, 这就同时形成了所谓的弹性光学效应。介电常数变化可以形成散射光波源。泵浦光、声波和散射光彼此耦合, 满足能量和动能守恒。即

$$\omega_p = \omega_s + \omega_a, \quad K_p = K_s + K_a$$

通常声波频率(ω_a)远小于泵浦和散射光波频率(ω_p, ω_s), 即 $\omega_a \ll \omega_p$ 和 $K_p \approx K_s$, 则超声频率为

* 国家科委 863 高技术项目。

收稿日期: 1997-06-26; 收到修改稿日期: 1997-09-29

$$\Omega = 2\omega(nv_a/c) \sin(\theta/2) \quad (1)$$

式中 ω 为入射激光频率, n 为介质的光学折射率, θ 为散射角。当 $\theta = \pi$ 时, 后向布里渊散射激发的超声频率最高。对玻璃材料, $n \sim 1.5$, $v_a \sim 10^5$ cm/s, 所以由(1)式知 $\Omega/\omega \sim 10^{-4}$, 在布里渊散射过程中, 散射光子和声子是成对出现的, 因此声强约为散射光强的 10^{-4} 倍, 约为入射光强的 10^{-5} 倍左右。声强是声波的能量密度, 即单位时间内通过垂直于声波传播方向单位面积的声波能量。声强与声压的关系是

$$I_a = (1/2) (P_a^2/\rho v_a) \quad (2)$$

式中 P_a 为声压, 它是介质中有声波时的压力与无声波时的静压力之差。

3 实验装置

实验装置结构排布如图 1 所示。

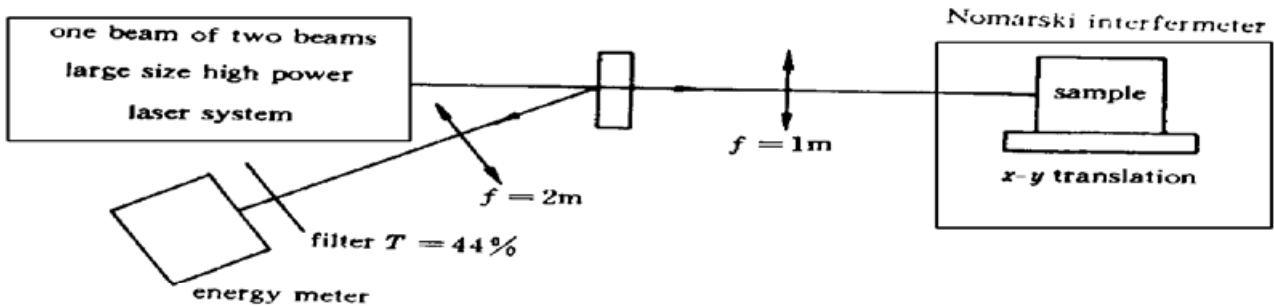


Fig. 1 Experiment setup of laser damage

两路激光系统的一路, 经过十一级放大后输出脉冲宽度为 2 ns 左右, 发散角为 0.2 mrad, 5 倍衍射极限。根据破坏需要调整泵浦电压获得不同能量的输出。光束输出口径为 $\phi 60$ mm, 然后经过 $f = 1$ m 的透镜聚焦, 在焦点处附近进行破坏研究。

判定光学材料破坏的工具是诺曼斯基偏光干涉仪和 CCD 相机, 用 He-Ne 激光 ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) 做探测光。诺曼斯基偏光干涉仪和 CCD 相机装置框图可参见文献[1, 2]。只要观测到 CCD 测得的干涉条纹变得不规则, 就可以判断光学材料出现微小的破坏。

在光学材料的破坏实验中, 采用 1-on-1 的方式进行, 即在样品的一个位置上只照射一次激光, 不管这点是否发生破坏, 下一次另换一个位置继续实验。破坏阈值定义为最大的不破坏能量与最小的破坏能量两者的平均值。

4 实验结果与分析

4.1 K₈ 玻璃的测量结果及分析

样品的光学质量、加工质量都很好, 没有杂质颗粒。破坏前的干涉图如图 2(a) 所示。破坏阈值为 24.7 J/cm^2 , 其功率密度为 $1.23 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ 时(焦斑尺寸大小为 $\phi 6$ mm), 破坏的干涉图如图 2(b)。当在能量密度为 65.5 J/cm^2 时后表面出现肉眼可分辨的炸裂破坏, 图 2(c) 为后表面破坏严重的干涉图样。从图 2(c) 中可以看到破坏斑点对 He-Ne 光的散射使得破坏区域中心处的干涉条纹完全消失, 剩下的只是另外一路光信息。在破坏区域的外围明显地存在着一圈表示残余应力分布的干涉条纹弯曲。其破坏形貌如图 3(b) 所示, 图 3(a) 是前表面破坏的形貌, 可以看出后表面破坏比前表面要严重得多。

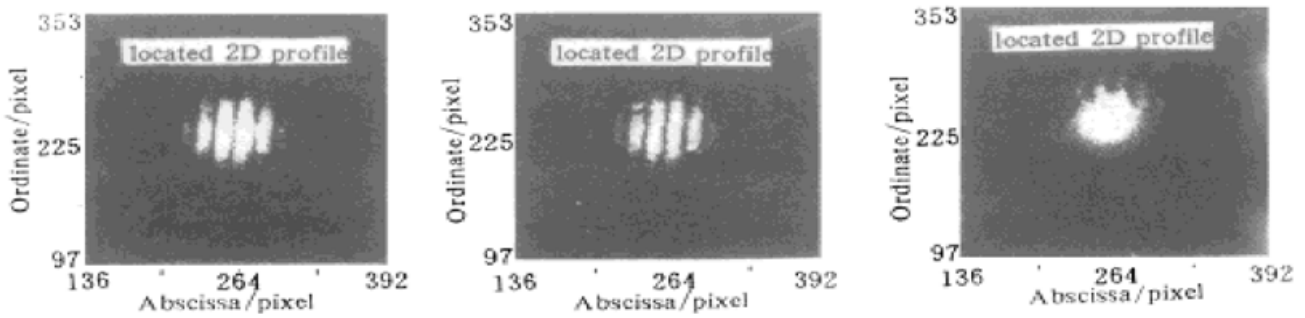


Fig. 2 Measurement of the residual stress and damage spot of K8 glass. (a) Interferogram of undamage, (b) Interferogram of damage (initial damage), (c) Interferogram of damage (large area damage)

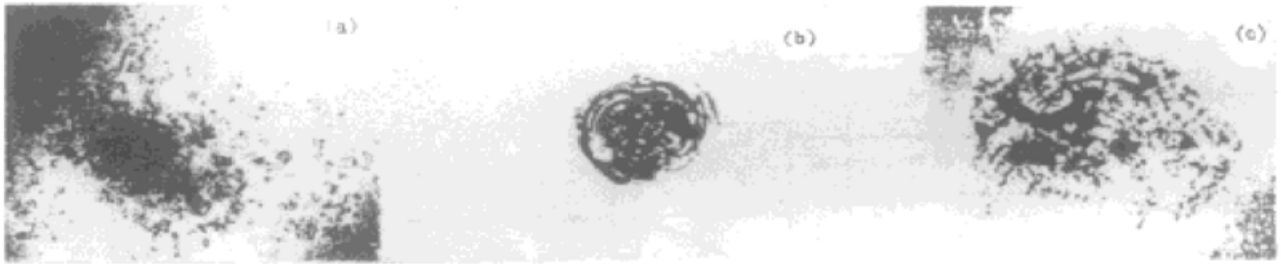


Fig. 3 Damage morphologies of K8 glass. (a) Front surface damage, (b) Rear damage surface, (c) Rear surface damage

实验发现, K₈ 玻璃的破坏先在后表面产生, 当功率增强时, 才在材料的前表面产生破坏, 后表面的破坏程度要比前表面的深得多。当能量密度为 65.5 J/cm^2 时在玻璃体内出现多根细丝状自聚焦痕迹, 这是由于高功率激光以多模方式运行造成的。在自聚焦效应中, 影响介质折射率的机制及其响应时间见表 1^[3, 4], 在脉冲宽度范围 $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ s}$, 这时起主要作用的机理是电致伸缩效应^[5, 6]。对于入射光强 $1.23 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$, 光压约为 $4 \times 10^5 \text{ Pa}$, 不会形成直接破坏。这时主要是在强激光的作用下, 由于受激布里渊散射激发超声, 产生强大的声压引起材料的破坏。受激布里渊散射在玻璃体内形成相干叠加的声波, 由于时间极短, 冲击波的波前压力很高, 可以利用(2)式求得声压。代入玻璃材料的相关参数 ($\rho = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $v_a = 5 \times 10^3 \text{ m/s}$), 可以估算出声压为 $1.7 \times 10^8 \text{ Pa}$, 波后存在相近幅度的负超压。当冲击波在固体内传播时, 由于未受该物质的阻挡, 波主要以压力的形式传播; 到了后表面, 近似为自由表面, 由于波前压力使后表面向空气中快速向前运动, 紧跟在后面的负超压将表面向后拉, 紧贴在后表面的物质受到正负两种压力的叠加极易撕裂, 撕裂物质从波中获得动能飞散, 因而使反射波能量减少, 加上声阻影响波传到前表面时更小, 所以后表面先坏, 且坏得厉害。

Table 1. Physical mechanisms of nonlinear refractive index change

| order | physical mechamism | n_2/esu | τ/s |
|-------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | molecular-orientation Kerr effect | $10^{-11} \sim 10^{-12}$ | $10^{-11} \sim 10^{-12}$ |
| 2 | molecular redistribution (libration) | $10^{-12} \sim 10^{-13}$ | 2×10^{-13} |
| 3 | nonlinear electronic polarizability | $10^{-13} \sim 10^{-14}$ | 10^{-15} |
| 4 | Electrostriction | $10^{-11} \sim 10^{-12}$ | $10^{-8} \sim 10^{-9}$ |
| 5 | Thermal changes | $10^{-5} \sim 10^{-4}$ | $10^{-1} \sim 10^0$ |

另一方面, 玻璃对这种微波超声有很强的吸收, 当使玻璃温度急剧升高时也可以通过热应力而造成破坏。由于高频声子的强烈衰减形成的局部加热也是破坏的可能因素, 其衰减长

度通常在几微米到几十微米之间。代入玻璃相关参数, $v_a \approx 5 \times 10^5 \text{ cm/s}$, $\rho_0 = 2.5 \text{ g/cm}^3$, $k_a \approx 4\pi \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$, $\omega_a \approx 2\pi \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, $n = 1.5132$, 声子的衰减距离约为^[3]

$$l_a = 1/\alpha_a = \rho_0 v_a / \eta_s k_a^2 \approx 20 \mu\text{m}$$

式中 $\eta_s \approx 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$ 为光学玻璃的粘滞系数。即 $\alpha_a \approx 5 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$, 对应的声子寿命为 4 ns 左右。这种热过程要比光学材料直接吸收激光能量形成的热过程要显著得多, 因为好的光学材料对光的吸收是很微弱的。所以破坏形貌既有炸裂破坏也有烧熔破坏, 如图 3(c) 所示。

4.2 掺钕硅酸盐的测量结果及分析

对掺钕硅酸盐玻璃做了破坏实验, 结果如图 4 所示。破坏阈值为 23.7 J/cm^2 。当能量密度为 82 J/cm^2 时出现肉眼可分辨的破坏, 其破坏形貌如图 5 所示。先在后表面产生微小破坏。其破坏机理与 K₈ 玻璃类似, 都是在激光作用下电致伸缩效应引起受激布里渊散射, 产生很强的微波超声引起的冲击波造成的破坏和由于材料对超声的吸收通过热应力造成的破坏。

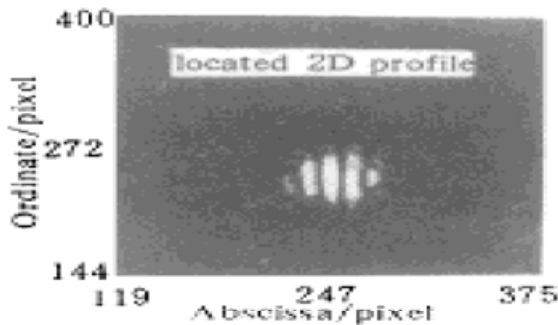


Fig. 4 Measurement of the residual stress and damage spot of Nd glass

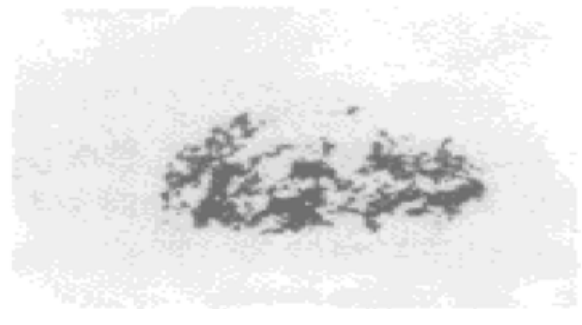


Fig. 5 Damage morphologies of Nd glass

参 考 文 献

- [1] Haiwu Yu, Shaoxian Meng, Wollaston prism design and working parameters in the Nomarski polarized light interferometer. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(8): 2310~ 2312
- [2] 陈 飞, 於海武, 孟绍贤, 用 Nomarski 干涉仪与数字相机研究光学材料的破坏. *中国激光*, 1997, **24**(10): 920~ 924
- [3] E. Wolf, *Progress in Optics*, Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1974, XII, 1~ 50
- [4] Robert W. Boyd, *Nonlinear Optics*, New York: Academic Press, Inc. 1992, 335, 432
- [5] 孟绍贤, 杨镜新, 於海武, 受激布里渊散射和超声空化. *中国激光*, 1996, **23**(3): 241~ 244
- [6] Haiwu Yu, Shaoxian Meng, Transient stimulated Brillouin scattering and damage of optical glass. *J. Appl. Phys.*, 1997, **81**(1): 85~ 88

Damage of Optical Glass Materials with 2 ns Large Aperture High Power Laser

Chen Fei Meng Shaoxian

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 26 June 1997; revised 29 September 1997)

Abstract The surface damage thresholds of K8 glass and Nd glass exposed to 2 ns large size high power laser are measured with a Nomarski polarized light interferometer, and the damage mechanism is studied. The ultrasound wave induced by the stimulated Brillouin scattering(SBS) is found to dominate the damage at the nanosecond pulse laser radiation.

Key words damage, Nomarski interferometer, SBS, large size high power laser.