

# 高重复频率激光对光学材料损伤特性的研究

龚 辉 李成富 崔俊文 葛月明

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 研究了几种红外窗口材料的高重复频率 Nd:YAG 激光和 Cu 蒸气激光体损伤规律, 发现样品损伤有明显积累效应。经过分析, 发现高重复频率激光损伤是一个微观损伤积累过程, 并引入吸收元的概念, 建立了一个简单的损伤积累模型。利用激光预辐照技术, 提高了材料的损伤阈值。

**关键词** 高重复频率激光损伤, 积累效应, 激光预辐照。

自从六十年代初激光器问世以来, 光学元件在高功率激光作用下引起的损伤一直是激光工作者和元件制造者共同关心的问题, 作者曾用单脉冲激光对晶体材料和玻璃材料损伤进行研究<sup>[1~3]</sup>, 取得了一些有益的结果, 但实际应用中许多元件都是在高重复频率的条件下使用的, 这种情况下的损伤规律与单脉冲损伤有很大差别。这种损伤在国际上以前也很少做过研究, 因此研究高重复率激光辐照下的损伤不仅有很高的实用价值, 同时还有理论意义。作者用准连续声光调 Q Nd:YAG 激光器产生的 1.06  $\mu\text{m}$  序列脉冲对 LiF 晶体、MgF<sub>2</sub> 和氟铝酸盐玻璃进行了体损伤实验, 用 Cu 蒸气激光对红外玻璃 HW<sub>230</sub>、CaF<sub>2</sub> 晶体和 F<sub>3</sub> 玻璃体损伤规律进行了分析, 建立了一个简单模型以验证激光引起的缺陷损伤积累, 并提出利用激光预辐照处理技术来提高其抗高重复频率激光损伤能力。选用的 LiF 和 F-Al 玻璃都是优良红外窗口材料, 其红外透过极限分别为 7.8  $\mu\text{m}$  和 7.0  $\mu\text{m}$ , 可作为卫星和导弹窗口, 因此研究它的激光损伤有很现实的意义。

## 1 实验条件和方法

调 Q Nd:YAG 激光器用声光调制器(AO)调 Q、脉宽为 100 ns、频率 1 kc~10 kc 可调、输出重复频率为 25 Hz 的方波脉冲序列, 包络宽 4 ms, 每个包络中的小脉冲个数随着调制频率由 1 kc 变到 10 kc 在 4~40 个之间变化。小脉冲的间隔在 1 kc 时为 1 ms, 10 kc 时为 100  $\mu\text{s}$ 。Cu 蒸气激光波长为 0.5106  $\mu\text{m}$ 、脉宽为 30 ns、调制频率为 6 kc、方向性为 0.5 mrad。激光束用透镜聚焦到样品内。

进行了两个方面的实验, 一是选定频率, 采用不同激光功率, 观察作用多少脉冲后材料发生损伤, 研究脉冲积累对损伤的影响以推断高重复频率激光损伤机制。损伤观察采用 He-Ne 散射光法。二是讨论了激光亚阈值辐照对损伤的影响。

## 2 实验结果和讨论

### 2.1 测试结果

高重复频率激光损伤实际上是一个多脉冲损伤过程，作者选定调制频率(10 kc)，激光的占空比固定，峰值功率的变化幅度也很小，改变激光辐照功率，得到样品发生宏观损伤时激光辐照脉冲数与激光辐照功率的关系。图 1 给出了 LiF 晶体、氟铝酸盐玻璃和 MgF<sub>2</sub> 晶体的调 Q Nd:YAG 激光损伤阈值测量结果。其中 MgF<sub>2</sub> 晶体调制频率为 1 kc。图 2 为 Cu 蒸气激光对红外玻璃 HW<sub>c30</sub>、CaF<sub>2</sub> 晶体和 F<sub>3</sub> 玻璃体损伤的实验结果，调制频率为 6 kc。损伤阈值用高重复频率激光平均功率密度表征。从图中可知，随着脉冲数增加，激光损伤阈值变小，趋向一定值，激光低于此值材料将不发生损伤，这个最低功率值与材料本身特性有关。图 3 给出了红外玻璃 HW<sub>c30</sub> 损伤发展过程。

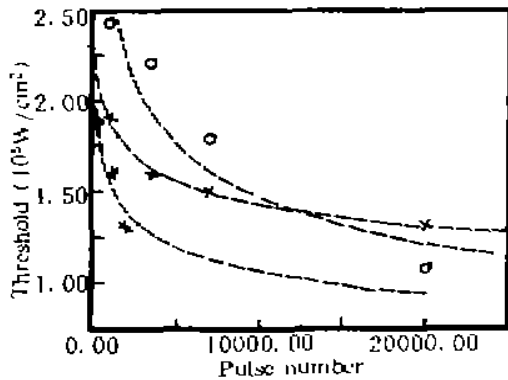


Fig. 1 Damage threshold as a function of high repetitive frequency YAG laser pulse number  
 × : Al-F glass, \* : MgF<sub>2</sub> crystal, o : LiF crystal

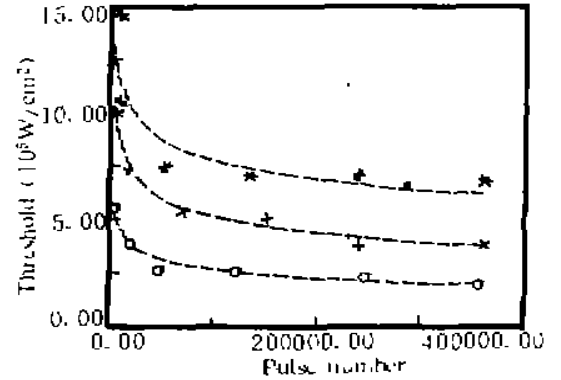


Fig. 2 Damage threshold as a function of high repetitive frequency Cu vapor laser pulse number  
 × : F<sub>3</sub> glass, \* : HW<sub>c30</sub> glass, o : CaF<sub>2</sub> crystal

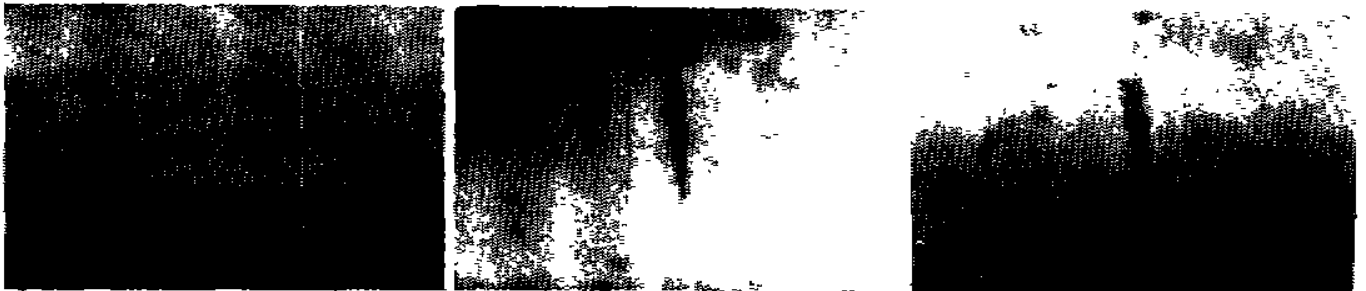


Fig. 3 A morphology change shows damage development in HW<sub>c30</sub> glass

### 2.2 损伤机制

经过分析发现，高重复频率激光损伤是材料内微观缺陷吸收激光后的非线性发展积累过程：一般材料在制备和加工过程中，存在大量的微观缺陷，这些微观缺陷具有比材料本征吸收大得多的吸收率<sup>[4]</sup>，在材料与激光脉冲相互作用的过程中，缺陷吸收将占主导地位，可在材料内形成局部高温，达到一定程度就会造成材料缺陷处首先发生热爆炸、雪崩离化等过程，从而使缺陷进一步扩大，但材料局部或整体的结构/物性并未发生宏观损伤。因此对于高重复频率激光损伤，虽然每个脉冲的激光强度比较小，即一个脉冲并不能使材料发生宏观性损伤，但可能引起材料内微观缺陷的爆炸和发展，这种微观损伤初始时破坏程度很小，对材料光学特性影响很小，没有引起 He-Ne 散射光的变化，但用更先进的观测手段(扫描电镜等)能够观察这种变化，Clark 等人<sup>[5]</sup>已证实了这种变化。然而每个微观缺陷的爆炸和发展，将增

加对后续激光脉冲的吸收, 导致更大的微观损伤发生。这种微观缺陷损伤的发展最终导致材料灾难性损伤。值得注意的是本实验发现, 在高重复频率激光损伤时, 每个激光脉冲强度不能低于一个最小值, 否则在材料中不能产生微观损伤, 再多的激光脉冲也不能发生宏观损伤。这个最小值与材料本身特性和损伤产生机制有关。一般情况下, 多脉冲激光损伤阈值远远低于单脉冲损伤阈值。因此, 在材料使用过程中激光损伤的积累过程应十分重视。

经过以上分析, 可建立一个简单的激光损伤积累模型。由缺陷吸收理论模型<sup>[6]</sup>可知, 缺陷吸收大小取决于吸收截面、入射光强、脉冲宽度、缺陷大小以及热传导系数、热扩散系数和热容等参数。为了便于分析, 首先把材料的缺陷看作很多个吸收元, 每一个吸收元其热性质参数认为相同, 对激光的吸收取决于入射光强和脉冲宽度, 这样不同的缺陷包含的吸收元数量不同, 对激光吸收大的吸收元多, 小的吸收元少, 缺陷对激光的吸收就取决于吸收元数量。因此, 对于高重复频率激光每个脉冲引起材料内微观缺陷的爆炸和发展, 并增加对后续激光脉冲的吸收, 导致更大的微观损伤发生的过程可以认为是每一个吸收元吸收激光脉冲后产生新吸收元的过程。而每一个吸收元产生新的吸收元数与材料本身特性和对激光脉冲吸收有关, 由于激光脉冲宽度已知, 所以每一个吸收元吸收激光脉冲后产生新吸收元数为:

$$P = aI^s \quad I > I_0; \quad P = 0 \quad I < I_0 \quad (1)$$

其中  $I$  为脉冲峰值功率,  $a$  和  $s$  为常数, 与材料本身特性有关。  $I_0$  为引起微观缺陷发展的激光最小强度。因此, 第  $n$  个脉冲作用后, 吸收元数为:

$$K_n = K_{n-1} + PK_{n-1}$$

对于  $n = 1$  时,  $K_0$  为材料初始吸收元数。

所以, 
$$dK/dn = PK$$
 两边积分得: 
$$\ln K + C = Pn \quad (2)$$

其中  $C$  为常数。当激光产生的微观损伤发展到一定程度即吸收元积累到一定数  $K_t$  时, 材料发生灾难性损伤。  $K_t$  是与材料本身性质和实验测试方法有关的常数。因此, 由(1)、(2)式得:

$$I_{thr}^s N = C_1 \quad (3)$$

其中,  $C_1$  为常数,  $I_{thr}$  为损伤阈值下的脉冲峰值功率。可用高重复频率激光损伤阈值平均功率  $W_t$  来表示  $I_{thr}$ , 则:

$$W_t^s n = C_2 \quad (4)$$

其中  $C_2$  为常数。其计算值如图 1 和图 2 中的虚线所示。可见, (4)式能很好的符合实验结果, 进一步说明激光产生的微观损伤积累过程是高重复频率激光损伤机制。

### 2.3 激光预辐照对高重复频率激光损伤的影响

高重复频率激光损伤主要是由每个脉冲引起的微观破坏发展积累到一定程度从而导致灾难性损伤, 因此为了提高抗高重复频率激光损伤, 关键在于减少材料初始缺陷数, 从而减小微观损伤积累, 抑制激光引起的微观损伤产生, 达到提高损伤阈值的目的。激光预辐照技术正是一种有效减少材料缺陷数的方法<sup>[7,8]</sup>。作者对氟铝酸盐玻璃进行了实验, 把很低的功率(低于引起微观损伤的激光强度)以相同的时间间隔作用在样品的同一点上( $n$ -on-1)。这相当于用本身的激光对样品进行亚阈值预辐照。激光预辐照相当于使材料进行退火, 达到消除材料表面和内部原来的化学吸附物、残留热应力等缺陷。结果如图 4 所示。经激光预辐照后 F-Al 玻璃的损伤阈值始终高于未预辐照的损伤阈值的 20%左右, 表明激光预辐照对提高 F-Al

玻璃的抗高重复频率激光损伤能力有较好效果。

**结 论** 1) 通过分析发现高重复频率激光损伤机制在于：每个脉冲在材料中引起微观缺陷的爆炸和发展，并对后续激光脉冲吸收增加，进一步导致更大的微观损伤发生，积累到一定程度最终导致材料灾难性损伤；2) 对于高重复频率激光损伤，脉冲有个最低强度值，如果低于这个强度将不能发生损伤积累过程；3) 利用低于产生微观损伤的激光强度的激光预辐照处理材料，消除了材料原来的一些缺陷，从而抑制了激光引起的微观损伤积累，有效地提高了材料的抗高重复频率激光损伤能力。

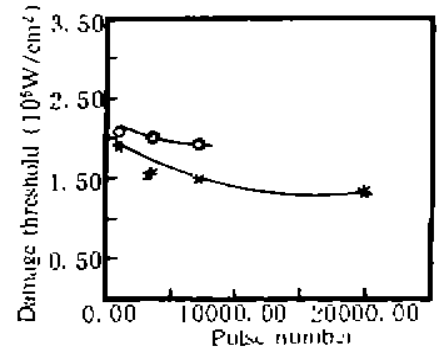


Fig. 4 Comparison of n-on-1 and 1-on-1 experiment in Al-F glass.

### 参 考 文 献

- [1] 孙 扬等，白宝石晶体的激光损伤. 中国激光, 1992, 19(10): 861~864
- [2] 李成富等,  $Ti^{3+}:Al_2O_3$  晶体在 1.06  $\mu m$  和 0.53  $\mu m$  脉冲激光作用下的损伤研究. 1991'激光的热和力学效应学术会议论文集. 上海, 1991: 64~67
- [3] 龚 辉等, 激光对光学薄膜损伤的热冲击效应. 1993, 全国光学薄膜学术会议论文集. 无锡, 1993: 75~78
- [4] N. Bloembergen, Role of cracks, pores, and absorbing inclusions transparent dielectrics. *Appl. Opt.*, 1973, 12(4): 661~664
- [5] S. E. Clark, D. C. Emmony, The non-destructive prediction of laser damage. *Laser Induced Damage in Optical Materials*: 1988, Natl. Bur. Stand. (V. S.) Spec. Publication 775, 1988: 62~72
- [6] A. A. Manenkov, Fundamental mechanisms of Laser induced damage in transparent solids, up-to-date status of research and understanding. *Laser Induced Damage in Optical Materials*: 1988, Natl. Bur. Stand. (V. S.) Spec. Publication 775, 1988: 486~496
- [7] J. Swain, W. Lowdermilk, D. Milam, The effect of baking and pulsed laser irradiation on the damage threshold of potassium dihydrogen phosphate crystals. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, 41(1): 12~16
- [8] P. A. Temple, W. H. Lowdermilk, D. Milam Carbon dioxide laser polishing of fused silica surfaces for increased laser-damage resistance at 1064 nm. *Appl. Opt.*, 1982, 21(18): 3249~3255

## Optical Damage Study of Materials with High Repetitive Laser Pulses Irradiation

Gong Hui      Li Chengfu      Cui Junwen      Ge Yueming

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

(Received 10 May 1994; revised 25 January 1995)

**Abstract** Optical damage of several kinds of infrared window materials with 1.06  $\mu m$  and 0.5106  $\mu m$  high repetitive laser pulses irradiation has been studied. Mechanism of laser damage is considered as laser-induced defect development accumulation process. We first recommend a concept of an absorber and establish a simple model to verify this process. To increase resistance of infrared window materials to the repetitive laser pulses damage, a laser pre-irradiation technique is used.

**Key words** high repetitive laser pulses damage, accumulation effect, laser pre-irradiation.