

光学材料的多脉冲激光损伤研究

夏晋军 程 雷 龚 辉 李仲伢 李成富

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 研究了 ZF_2 玻璃多脉冲与单脉冲激光损伤, 分析了多脉冲损伤阈值与脉冲数, 脉冲间隔的关系, 进行了多脉冲损伤机理的分析, 得出多脉冲损伤是热和缺陷累积共同作用最终促成雪崩击穿的结果, 并提出了提高抗多脉冲激光损伤的方法。

关键词 多脉冲激光损伤, 热和微破坏累积。

1 引 言

光学玻璃在激光器件中是重要的光学材料, 具有良好光学常数的玻璃在激光技术中更是广泛使用。 ZF_2 玻璃作为重燧玻璃的一种, 具有化学稳定性好, 线膨胀系数小^[1]等优点, 所以研究 ZF_2 玻璃的激光损伤特别是多脉冲激光损伤具有较重要的意义。

本文在 ZF_2 玻璃单脉冲激光损伤研究的基础上重点研究多脉冲激光的损伤作用, 结果表明 ZF_2 的多脉冲损伤是热和缺陷累积共同作用的结果。而且通过与单脉冲损伤形貌比较, 认为多脉冲损伤与单脉冲损伤的基本物理机制是一样的, 只是多脉冲多了热和微破坏的积累作用。最后, 文中提出了如何提高抗累积损伤的办法。

2 实验条件

用两级放大 Nd:YAG 激光器产生 $1.06 \mu\text{m}$ 基模激光, 脉宽为 10 ns, 光束聚焦于样品表面内 4 mm 处, 用 He-Ne 散射光法观察损伤情况, 实验装置如图 1 所示。实验后用 Normarski

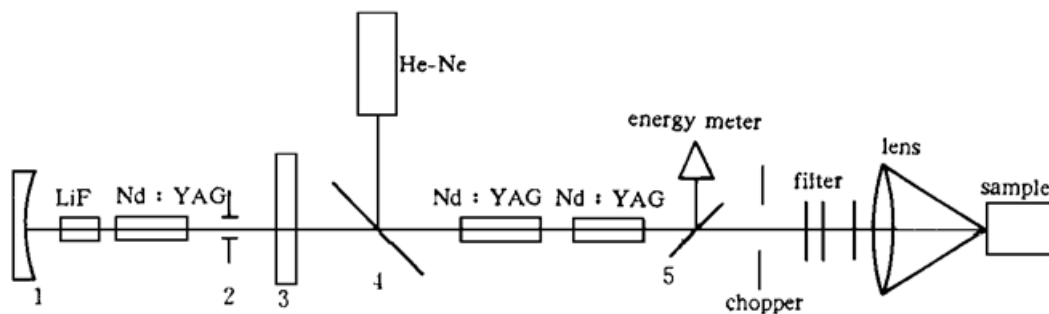


Fig. 1 Experimental set-up for laser damage

1. R= 3mHR, 2. aperture, 3. output coupling T= 50%, 4, 5, beam splitter

显微镜观察损伤形貌, 分析损伤斑点, 从而推断激光破坏的物理过程。实验中聚焦透镜焦距为 60 mm, 焦斑大小取 $1/e^2$ 光斑处的区域大小。

3 实验结果和分析

3.1 损伤几率和激光能量的关系

实验测试了 ZF_2 单脉冲损伤和多脉冲损伤几率与激光能量的关系, 单脉冲损伤采用 1-on-1

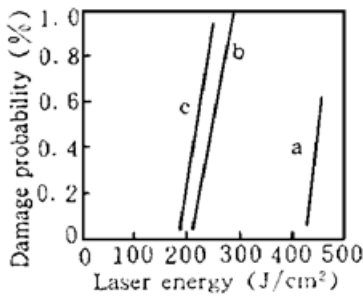


Fig. 2 Dependence of damage probability on laser fluence

a. 1 pulse, b. 40 pulses, c. 100 pulses

-1 方式进行, 即在样品的一个位置上只照射一次激光, 不管这点是否遭到损伤, 都换一个位置继续实验。多脉冲损伤采用 N -on-1 方式, 即对同一点连续辐照 N 次, 然后不管发生破坏与否, 都重新换一位置继续实验, 而且对于破坏的要求是首次破坏必须发生在第 N 次, 本实验采用的是 1 Hz 的多脉冲辐照。实验测试了单脉冲、40-on-1 和 100-on-1 的 ZF_2 玻璃损伤几率曲线, 如图 2 所示。取 50% 损伤几率处的激光能量为损伤阈值。于是得单脉冲、40-on-1 和 100-on-1 的阈值分别为 447.8 J/cm^2 , 254 J/cm^2 , 218.5 J/cm^2 。从图 2 可以看出, 不管是单脉冲损伤还是多脉冲损伤, 损伤几率都是随着激光

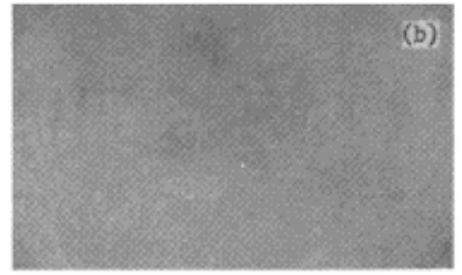
辐照能量的增加而增大的。多脉冲损伤较单脉冲损伤阈值低, 一定激光能量造成的损伤几率多脉冲要比单脉冲高许多。这说明 ZF_2 玻璃的累积效应是很明显的。

3.2 损伤形貌和损伤机理分析

单脉冲激光损伤, 一般认为是材料吸收激光能量后, 产生高温熔融和炸裂破坏或雪崩电离击穿破坏。 ZF_2 玻璃的单脉冲损伤形貌正面和侧面如图 3 所示。可以看出是发生了自聚焦导致雪崩电离击穿破坏。多脉冲损伤形貌正面和侧面如图 4 和图 5 所示, 可以看出它也是发生了电离击穿破坏, 由此可以认为, 多脉冲与单脉冲损伤的物理机制是一样的, 都是发生了雪崩电离击穿破坏, 只是多脉冲有个累积效应, 发生了热和微破坏的累积。从损伤形貌中可以看到, 脉冲数越多, 损伤形貌越大, 熔融的迹象越明显。而且多脉冲损伤虽然总的趋势是向前聚焦击穿, 但也横向熔融膨胀, 不象单脉冲损伤, 具有很尖细的聚焦细丝, 这正是多脉冲热积累的反应。单脉冲破坏, 由于脉冲能量很高, 使材料的性质发生突变, 造成自聚焦, 产生雪崩电离击穿, 在材料体内迅速产生高温和强大的热应力, 使材料炸裂(图 3 正面), 而且由于作用时间短, 来不及发生热传导, 热应力就使材料炸裂, 所以其熔融迹象不明显, 只是在作用中心处有熔融痕迹(图 3 侧面)。而多脉冲作用下, 由于单个脉冲能量低, 它们在材料体内引起的热效应较弱, 其效果不足以引起材料的宏观熔融破坏或热应力炸裂, 只是随着作用脉冲数的增多, 引起的热效应在材料体内不断产生热积累, 加之玻璃材料的不良导热性, 致使材料体内温度不断升高。随着温度的升高和作用时间的延长, 产生的热在作用点附近扩散, 使作用点附近温度也不断升高。能量沉积的增加, 温度的升高, 又使玻璃的热学性质, 光学性质发生变化, 产生自聚焦, 引起电离击穿, 电离击穿又释放出大量的热量, 使原本因热积累已具有较高温度的作用点附近区域, 沿着自聚焦击穿轨迹发生宏观的熔融破坏, 并掩盖了自聚焦细丝, 表现为较单脉冲更大、更明显的熔融形貌。熔融体的膨胀使材料发生炸裂。从图 4、图 5 中可以反映出来。



(a) front,



(b) side

Fig. 3 Damage morphology for one pulse

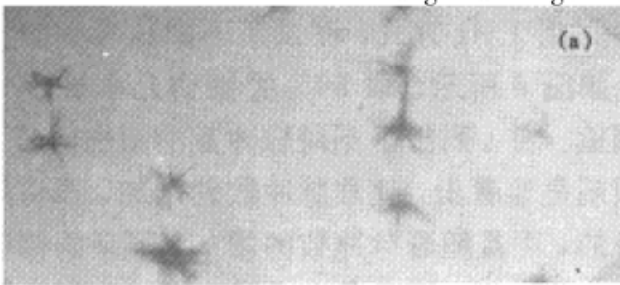


(a) front,

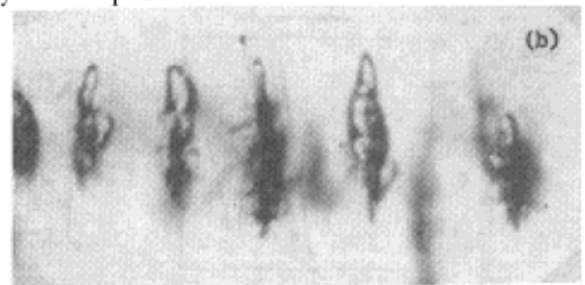


(b) side

Fig. 4 Damage morphology for 40 pulses



(a) front,



(b) side

Fig. 5 Damage morphology for 100 pulses

以前, 很多人认为在累积损伤中只有热积累, 但通过本文实验发现, 在相同累积脉冲数条件下, 不同的脉冲间隔损伤阈值相差较大, 如果只按照热积累分析, 考虑玻璃的热学性质和脉冲间隔时间, 不应有这么大的相差, 因此, 作者认为除了热积累外, 还有微破坏累积作用。这里所说的微破坏是指微观缺陷, 而不是指微小的机械破坏, 在多脉冲作用过程中会在材料体中不断形成微观缺陷, 这些微观缺陷不表现出宏观的破坏, 用通常的实验手段观察不到, 但这些微观缺陷的存在却能增加材料对后序激光的吸收, 从而促进最终雪崩击穿的发生。另一方面, 微观缺陷也会发生弛豫, 从而使累积作用与整个作用时间以及脉冲时间间隔有着密切关系。有关累积损伤中微观缺陷的作用, 正在作进一步的研究。

对于多脉冲激光损伤中缺陷的积累, 本文可利用缺陷损伤模型^[2]来说明。设想一个以作用点为中心, 半径为 r_0 的球体, r_0 小于激光作用波长。随着多脉冲的不断作用, 球域内的缺陷密度不断增大, 同时球内的电离电子数也不断增多, 并向球外扩散, 形成一半径为 r 的电子云球, 直到电子数达到一定数量发生雪崩击穿。

电子数密度分布为:

$$n(r, t) = \frac{2f(t) (\tau_0)^3}{\pi r D_e} \int_0^{\infty} \frac{\sin x (r/r_0) [\sin x - x \cos x] \{1 - \exp [-(\gamma + D_e x^2 / r_0^2) t]\}}{x^2 [x^2 + (r_0)^2 \gamma / D_e]} dx \quad (1)$$

式中 D_e 为电子扩散率, γ 为电子衰减速率, t 为激光脉宽。其中 $f(t)$ 表示电子产生速率。

$$f(t) = [\eta_Q \alpha_1 I \frac{1-R}{h\nu} + \frac{\beta I^2(1-R)^2}{2h\nu} + \frac{\kappa I^3(1-R)^3}{3h\nu} + \frac{\epsilon I^4(1-R)^4}{4h\nu}] \theta(t) \quad (2)$$

$$\alpha_1 = N_d g(\nu) e^2 \frac{\pi}{mc n(1-R)} \quad (3)$$

式中 α_1 、 β 、 κ 、 ϵ 分别表示单光子、多光子吸收系数, η_Q 为单光子跃迁量子效率, R 为材料表面反射率, $\theta(t)$ 为单位阶跃函数, $g(\nu)$ 为吸收系数的线形函数。当考虑临界破坏时, 此时球域内缺陷数量很大, 主要表现为单光子吸收, 多光子吸收部分可以忽略, 所以, (2) 式变为

$$f(t) = \frac{\eta_Q \alpha_1 I(1-R)}{h\nu} \theta(t) \quad (4)$$

式中 N_d 为临界损伤时的缺陷密度, n 为折射率。设发生破坏时的电子数密度 $n(r, t)$ 为与 r, t 有关的定值。则可推得:

$$N_d I = C \quad (5)$$

式中 I 为损伤阈值, C 为由材料决定的常数。

由此可见, 损伤阈值下降, 将导致临界损伤时的缺陷密度上升, 上升的幅度由材料的特性决定。这些上升的缺陷密度作者认为在多脉冲损伤中, 正是由前序激光脉冲产生。

3.3 损伤阈值与多脉冲数的关系

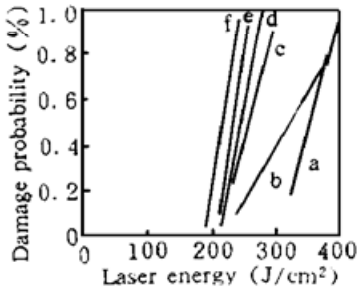


Fig. 6 Damage probability versus laser energy density for different pulse number
a. 3 pulses, b. 10 pulses, c. 30 pulses, d. 40 pulses, e. 60 pulses, f. 100 pulses

多脉冲采用 1 Hz 方式, 测试了不同脉冲数的损伤几率曲线, 如图 6 所示。取 50% 的损伤几率处激光能量为损伤阈值。表 1 列出了不同脉冲数的损伤阈值。由表 1 可以很明显地看出, 随着脉冲数的增加, 损伤阈值是明显下降的, 而且随着脉冲数的增加, 下降的幅度是越来越小, 最后趋于一平稳状态。图 7 为损伤阈值与脉冲数的关系曲线图, 这和 Platenak 等人对累积效应^[3]的研究结果是一致的。把图 7 的实验数据利用累积方程^[4], 可以得到图 8 的累积曲线。

Table 1. Dependence of damage threshold on number of pulses

number of pulse	3	10	30	40	60	100
threshold (J/cm ²)	353.5	324	258.8	254	235	218.5

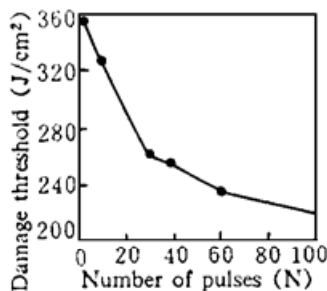


Fig. 7 Dependence of damage threshold on pulse numbers

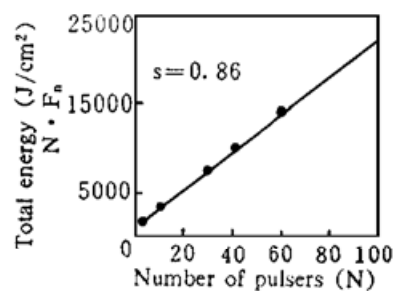


Fig. 8 Total energy versus the number of pulses

$$F_N = F_1 N^{s-1}$$

式中 F_1 为单脉冲损伤阈值, N 为脉冲数, F_N 为 N 个脉冲的损伤阈值, s 为材料特性参数。图 8 的纵坐标表示总能量, 即脉冲数与损伤阈值的积, 横坐标表示脉冲数。在 $\log\text{-}\log$ 坐标中, 积累曲线为一条斜率为 s 的直线。 s 表示累积效应的大小, s 越大, 则表示累积作用越小。ZF₂ 玻璃的 s 为 0.86, 可见 ZF₂ 玻璃的累积效应是很大的。

损伤阈值与脉冲数的上述关系作者认为是随着脉冲数的增加, 累积效应使损伤阈值下降, 但随着作用时间的加长, 材料体内的热积累会发生热传导, 而且将会有更多的微观缺陷发生弛豫, 即破坏处的恢复作用会加强, 从而抑制了损伤阈值的进一步下降。另一方面, 也有这种可能, 即能量实在太低, 根本不能使材料产生微观缺陷, 热效应也可忽略, 这时当然也不会有累积现象发生。这两种情况都使累积损伤有个能量下限, 低于能量下限则不论多少个脉冲也不能使材料破坏。

3.4 累积效应与脉冲间隔的关系

实验中测量了脉冲间隔分别为 0.5 s、1 s、2 s、3 s 的 10-on-1 的损伤阈值, 如表 2 所示, 图 9 为损伤阈值与脉冲间隔的关系曲线图, 由图中可以看出, 随着脉冲间隔的加长, 损伤阈值是呈增大趋势, 也就是说累积效应是越来越不明显, 这可以这样解释, 随着脉冲间隔的加长, 一方面, 材料体内的热积累会通过热传导传递出去, 另一方面, 许多在前序脉冲中产生的微观缺陷会发生弛豫, 从而使前序激光脉冲产生的影响减小, 累积效果减弱。由此, 可以推断, 累积效应应有一个累积寿命的限制, 脉冲间隔在累积寿命时间范围内, 才会有累积效应, 而如果脉冲间隔超过累积寿命时间, 则根本就不会发生累积作用, 而且热传导与微观缺陷寿命将共同决定材料的累积寿命。从图 9 可以看出, ZF₂ 玻璃的累积寿命在 3 sec 以上。

Table 2. Dependence of damage threshold on pulse interval

time (s)	0.5	1	2	3
threshold (J/cm ²)	282	292.5	296	298.5

3.5 提高抗累积损伤的方法

研究多脉冲损伤的最终目的, 是为了提高材料的抗多脉冲激光损伤的能力。基于以上的分析, 本文提出了以下提高抗累积损伤的办法, 一是根据累积损伤的自身特点来达到提高抗损能力, 如在使用中避开材料的累积寿命就能提高材料的损伤阈值。另一个是根据累积损伤与单脉冲损伤的相似性, 把单脉冲抗损伤中行之有效的办法, 比如激光预辐照, 钢化等用到多脉冲的抗损伤中, 也能达到预期的效果, 目前作者正对此进行进一步的研究。

结 论 本文通过对 ZF₂ 玻璃的多脉冲损伤研究表明, 多脉冲的损伤与单脉冲的损伤基本机制是一致的, 只是多脉冲发生了热和微破坏的累积。多脉冲损伤与脉冲数, 脉冲间隔有着密切关系。

对多脉冲损伤的研究与单脉冲一样, 都是很复杂的过程, 它们的破坏形式牵涉到很多方面, 如材料特性, 激光特性(波长, 脉宽等), 本文只是从一个侧面反应了材料的累积效应。

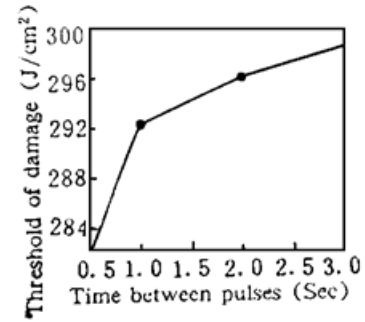


Fig. 9 Dependence of damage threshold on time between pulses

参 考 文 献

- [1] 干福熹等, 光学玻璃, 北京, 科学出版社, 1964, 414
- [2] N. R. Shetty, M. F. Becker, R. M. Walser, An anomalous absorption model to account for accumulation in N-on-1 damage in Si and GaAs. *Laser Induced Damage in optical Material*, 1986, 634~ 648
- [3] John R. Platenak, Rodger M. Walser, Michael F. Becker, Temperature effects on laser induced damage and accumulation in silicon. *Laser Induced Damage in Optical Material*, 1986 : 216~ 231
- [4] Y. Jee, M. F. Becker, R. M. Walser, Laser-induced damage on single crystal metal surfaces. *J. Opt. Soc. Am.*, 1988, **B5**(3) : 648~ 659

Accumulation and Laser Damage in Optical Glasses

Xia Jinjun Cheng Lei Gong Hui Li Zhongya Li Chengfu

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

(Received 18 September 1996)

Abstract Multi-pulses and single pulse laser induced damage to optical glasses was studied. The damage mechanism by multi-pulses laser was analysed and it was concluded that for multi-pulses thermal and structural defect accumulation induced material damage. The suggest for improving material anti-damage induced by multi-pulses is given.

Key words multi-pulses, thermal and structural accumulation.