

脉冲激光输出模式对介质薄膜损伤的影响^{*}

曹华梁, 程祖海, 叶克飞, 余亮英, 陈佳元

(华中科技大学 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 采用单横模 (TEM_{01}) 和多模横向激励高气压 (TEA) 脉冲二氧化碳激光器和不同焦距的透镜对 $10.6\ \mu\text{m}$ 的增透膜进行了破坏实验, 对破坏样品进行了显微分析, 研究了不同激光模式和不同焦距透镜对薄膜破坏的影响。实验结果表明, 在短焦距透镜聚焦时, 相同能量密度的单横模激光脉冲焦距前比焦距后更容易造成薄膜的损伤, 破坏阈值相差 $5\ \text{J}/\text{cm}^2$; 使用长焦距透镜聚焦时, 在单模激光脉冲和多模激光脉冲幅照下薄膜的损伤阈值基本相同, 但比使用短焦距单模激光测量到的损伤阈值高。

关键词: 激光损伤⁺; 介质薄膜; 破坏阈值; 激光模式

中图分类号: TN249 V439 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2007) 05-0558-03

Effect of pulse laser mode on damage of dielectric thin film

CAO Hua-liang CHENG Zu-hai YE Ke-fei YU Liang-ying CHEN Jia-yuan

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics Huazhong Univ. of
Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract Laser induced damage in $10.6\ \mu\text{m}$ reflection reducing coating was observed using single mode (TEM_{01}) and multimode transversely excited atmospheric (TEA) carbon dioxide laser and different focal length optical lens. Damage samples were analyzed by microscope. Effect of laser mode and focal length on damage of dielectric thin film was studied. The results show that single mode laser radiation of same energy density is easier to induce damage for sample in the front of focal spot of short-focus lens than that behind focal spot of short-focus lens. The deviation of damage threshold was $5\ \text{J}/\text{cm}^2$. When using long-focus lens, the measured damage threshold of film is similar with single mode laser radiation or multimode laser radiation, but it is higher than that with single mode laser radiation when using short-focus lens.

Key words Laser induced damage⁺; Dielectric film; Damage threshold; Laser mode

1 引 言

随着激光技术的发展和激光器功率水平的提高, 对光学元件抗激光破坏能力的要求也越来越高, 光学薄膜的抗破坏能力对高能量 TEA CO_2 激光器及相关光学系统的正常工作极其重要, 是提高 TEA CO_2 激光器单脉冲能量要解决的难点之一。光学薄膜在一定能量密度下会遭到破坏, 因而研究各种激光因素对 $10.6\ \mu\text{m}$ 薄膜破坏的影响对于 TEA 激光器系统的整体设计、薄膜破坏阈值的测量、薄膜设计和镀制的优化有很强的参考价值。

薄膜破坏的研究经常采用 YAG 激光器^[1, 2], 输出脉冲可以高重复频率工作, 焦斑很小, 能量密度高, 激光器的脉冲能量不需要太高。针对高能脉冲 TEA CO_2 激光器的光学薄膜, 本文用 TEA CO_2 激光对 $10.6\ \mu\text{m}$ 的增透介质膜进行了破坏实验。TEA CO_2 激光器可用单模 TEM_{01} 和多模两种方式工作, 聚焦透镜采用长焦距 ($300\ \text{mm}$) 和短焦距 ($150\ \text{mm}$) 两种。在激光器单模式工作、短焦距聚焦条件下, 研究了样品在焦距前和焦距后的薄膜破坏; 同时分析了激光器在单模和多模工作条件下长焦距对测量薄膜破坏阈值的影响。

* 收稿日期: 2007-04-25 修订日期: 2007-06-27。

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328)。

作者简介: 曹华梁 (1972—), 男, 博士后, 研究领域为高功率激光器件。Email: hlcaomai@sohu.com

2 实验方法

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 脉冲激光通过一光阑, 经过 4 倍扩束系统, 在聚焦透镜前加一分光片测量脉冲能量, 夹持样品的平台可以在光具座上沿光轴方向大范围移动, 同时平台也可以在光轴方向和垂直光轴方向微移, 便于精确控制破坏点和激光光斑大小。激光器为紫外预电离 TEA CO_2 激光器, 波长 $10.6 \mu\text{m}$, 重复频率为 $1 \sim 3 \text{ Hz}$, 激光脉冲波形如图 2 所示, 脉宽约为 $0.25 \mu\text{s}$ 。激光器可以产生最大能量 4 J 的多模平顶光输出, 在激光器腔内放置一小孔光阑, 则可以输出最大能量 0.5 J TEM_{01} 的单模脉冲, 该激光器的单模和多模光斑如图 3 所示。两个聚焦透镜的焦距分别为 150 mm 和 300 mm , 由于激光多模输出时光斑半径比较大, 经扩束后激光入射到样品上的单脉冲能量由扩束前的 4 J 下降到 0.5 J 并且长焦距光斑比较大, 能量密度不足以破坏样品薄膜, 所以多模激光破坏实验时取消了扩束系统, 激光直接从光阑通过聚焦透镜聚焦。样品为 ZnSe 基 YbF_3/ZnSe 膜系, 中心波长 $10.6 \mu\text{m}$ 处的透过率为 99.4% 。

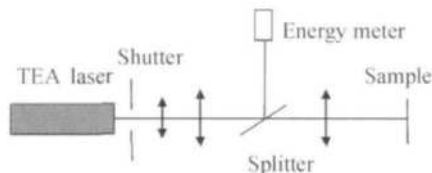


Fig. 1 Schematic of experiment setup

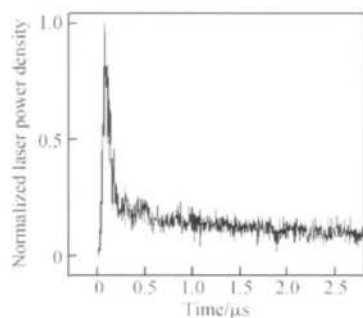


Fig. 2 Laser pulse shape



Fig. 3 Facular pattern of laser mode

2.2 破坏阈值测量方法

光学薄膜的破坏阈值定义有两种^[3]: 50% 损伤几率阈值与零损伤几率阈值。取不造成元件破坏的最大能量密度与造成损伤的最小能量密度的均值作为 50% 损伤几率阈值; 对测试结果进行统计分析后, 取对应于零损伤几率的能量密度作为零几率损伤阈值。测量方式也有两种: 1-on-1 和 n-on-1, 即用一个脉冲照射一个区域或 n 个脉冲照射同一个区域, 再检测该区域是否被破坏。薄膜破坏探测有很多方法^[4], 如等离子体法、相衬显微法, 透射反射法, 声光法等。本文采用 1-on-1 的方式和显微法来测量样品的 50% 损伤几率阈值。首先在聚焦透镜后测量光斑大小与样品平台位置的关系, 以便计算激光辐射的能量密度与样品位置的关系。在聚焦透镜后移动样品平台, 观测样品的破坏情况, 当肉眼无法判断样品是否被破坏时采用显微法观测样品的破坏情况, 判断样品是否被破坏, 计算最小破坏能量密度和最大未造成破坏的能量密度, 得到薄膜的损伤阈值。

3 实验结果与分析

3.1 单模脉冲激光破坏

将激光器工作在 TEM_{01} 模模式, 聚焦采用焦距为 150 mm 的透镜, 透镜后的激光脉冲能量在 0.35 J 左右, 在光具座上沿光轴方向从透镜焦距前移到焦距后, 观测样品的破坏情况。图 4 为 90 倍显微镜下样品被破坏的照片, 其中 (a) 为激光照射前薄膜照片, (b) 为没有被破坏的样品, (c) 为焦距前被破坏的样品, (d) 为焦点处被破坏的样品, (e) 为焦点后被破坏的样品。焦距前的破坏图案基本与 TEM_{01} 模的能量分布相似, 由此看出透镜焦点前光斑能量分布与激光模式相同, 薄膜被破坏的区域分布在激光能量比较集中的地方; 接近焦点处薄膜破坏区域很小, 但薄膜完全被破坏, 并且由于焦点可能在基片内, 产生巨大的热应力使基片后面薄膜产生很大区域的剥落; 焦点后的破坏比焦点前均匀, 基片后面也没有产生破坏。

测量激光光束为 TEM_{01} 模、聚焦透镜焦距为 150 mm 的最小破坏能量密度, 焦距前为 2.8 J/cm^2 , 焦距后为 8.2 J/cm^2 , 两者的破坏阈值分别为 2.68 J/cm^2 和 7.88 J/cm^2 , 相差 5.2 J/cm^2 左右。两种破坏方式得到的最小破坏能量密度相差很大, 分析光斑的光强分布可以看出: 焦点前光强分布不均匀, 使局部能量密度偏高, 导致整个光斑的最小破坏能量密度降低;

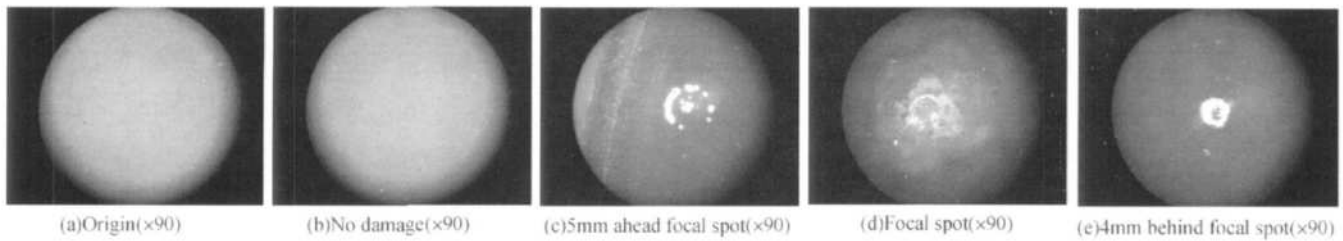
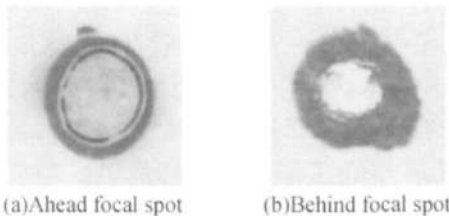
Fig. 4 Micrograph of damage thin film ($\times 90$)

Fig. 5 Facular pattern

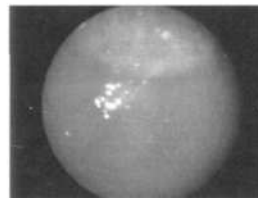
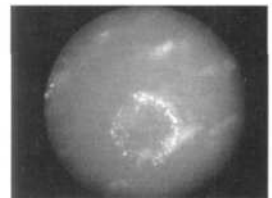
Fig. 6 Micrograph of damage thin film by $f=300$ mm lens

Fig. 7 Film damage by multi-mode laser

而焦点后的光强分布比较均匀,局部能量密度变化不大。图 5 为焦点前与焦点后的光斑,图 5(b) 中光斑中心部分能量太强,破坏了热敏纸,实际光强分布并非环形光斑。由图 5 可以看出,焦距后光斑已经不能保持激光光束的模式,能量密度分布比较均匀了,原因是焦距后激光能量分布为远场分布,能量密度中间高周边低。

采用焦距为 300 mm 的聚焦透镜在焦距后测量薄膜的损伤阈值,测得破坏阈值为 9.7 J/cm^2 ,薄膜破坏显微图如图 6 所示。破坏斑点在中心随机分布,表明激光模式对长焦透镜焦点后的破坏已经没有影响。

3.2 多模脉冲激光破坏

取掉激光器光腔中的小孔光阑,去掉扩束装置,在聚焦透镜前放置 $\phi 25 \text{ mm}$ 的光阑,选用焦距为 300mm 的聚焦透镜,前后移动样品,在焦距前测量薄膜的最大未破坏阈值和最小破坏阈值,得到薄膜的破坏阈值为 9.3 J/cm^2 。薄膜破坏情况如图 7 所示,破坏区域大部分集中在光斑周边。由于透镜前增加了光阑,可以认为光斑的能量分布基本上相同,但在边缘处存在没被激光照射的区域与被激光照射的区域,不同区域之间的温差产生的内应力使光斑周边的薄膜更容易脱落。 TEM_{01} 光束长焦距焦点后测得的破坏阈值要高一些,原因可能是焦点后的能量分布密度周边低,中间高,从图 4 的薄膜破坏情况和图 5 的光斑也可以看出这一点,光斑周边的内应力小,对该区域的薄膜破坏不起主导作用。

4 结 论

单模激光在聚焦透镜焦点前能量分布不均匀,破坏区域与激光光斑基本相同,局部能量密度较高,导致薄膜破坏阈值比较低,焦点后光强分布为远场分布,能量密度中间强周边低,破坏主要发生在光斑中心,破坏阈值相对比较高;多模激光的光强分布比较均匀,焦点前破坏主要发生在光斑周边。因此要准确测量薄膜的破坏阈值,应采用基模或多模激光光源,在聚焦透镜焦点后测量,得到的数据才比较科学地反映激光系统光学元件正常使用情况下要承受的能量密度。

参考文献:

- [1] 王 涛,赵元安,黄建兵,等. 重复率激光作用下光学薄膜损伤的累积效应[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17 (S0): 171~174
- [2] 胡海洋,范正修,刘 晔,等. 杂质对光学薄膜激光损伤阈值的影响[J]. 中国激光, 1999, A26(6): 489~492
- [3] 刘 强,林理彬,甘荣兵,等. 高反射膜激光零几率损伤阈值的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(6): 538~542
- [4] 甘荣兵,林理彬,蒋晓东,等. 用透射反射扫描法检测光学薄膜的激光损伤[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14 (1): 41~48

(编辑: 刘 萝 威)