

文章编号: 0258-7025(2009)11-3050-05

1064 nm 和 532 nm 激光共同辐照薄膜的损伤

周 明^{1,2} 赵元安¹ 李大伟¹ 范正修¹ 邵建达¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800)

²中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 建立了两个不同波长激光同时辐照薄膜的损伤阈值测试装置, 实验研究和对比 1064 nm 激光, 532 nm 激光, 1064 nm 和 532 nm 激光共同作用 3 种不同方式辐照 1064 nm 和 532 nm 增透膜 (ARF) 的损伤阈值及其损伤形貌。结果表明, 1064 nm 和 532 nm 激光共同作用损伤形貌和 532 nm 激光单独作用下的形貌相似, 532 nm 激光在诱发薄膜损伤因素中起主导作用。1064 nm 激光单独辐照薄膜的损伤阈值高于 532 nm 激光, 而 1064 nm 和 532 nm 激光共同作用下薄膜的阈值介于这两者之间。

关键词 薄膜; 激光损伤阈值; 不同波长; 缺陷

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093611.3050

Laser Damage of Optical Film with the Combined Irradiation of 1064 nm and 532 nm Pulse

Zhou Ming^{1,2} Zhao Yuan'an¹ Li Dawei¹ Fan Zhengxiu¹ Shao Jianda¹

¹ Key Laboratory of Material for High Power Lasers, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² Graduate Universities of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract A testing device of laser-induced damage threshold (LIDT) with the combined irradiation of different wavelength pulse was built. The damage morphology and the laser-induced damage threshold of 1064 nm and 532 nm anti-reflection film (ARF) were researched by 1064 nm pulse only, 532 nm pulse only and 1064 nm with 532 nm pulse combined irradiation. The result showed that the damage morphology of samples caused by 1064 nm and 532 nm pulse combined irradiation was similar with which of the 532 nm pulse, and the 532 nm pulse plays a leading role in the factors that induce damage. The LIDT of 1064 nm pulse is higher than one of 532 nm pulse, that of 1064 nm and 532 nm pulse combined irradiation is in the range between 1064 nm pulse only and 532 nm pulse only.

Key words thin film; laser-induced damage threshold; different wavelength; defects

1 引 言

倍频分离系统是目前许多在建的高功率固体激光装置的重要光学元件之一, 其光学性能和抗激光损伤阈值对整个系统的性能有重大影响^[1~3]。当激光器输出倍频激光时, 倍频分离膜受两种波长激光同时作用, 因此研究两个波长激光共同作用对光学薄膜损伤显得十分必要。

近年来国际上一些实验室开展了两个波长激光共同作用对 KDP 晶体损伤的实验研究, 如 M. A. Norton 等^[4,5]采用激光对 KDP 晶体进行多次辐照, 研究了 1064 nm 激光, 532 nm 激光以及 1064 nm 激光和 355 nm 激光共同作用下晶体损伤坑半径增长系数和损伤形貌差异, 研究结果表明, 1064 nm 和 532 nm 激光共同作用时多次辐照引起的 KDP 晶体

收稿日期: 2008-11-03; 收到修改稿日期: 2009-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(60678004)资助项目。

作者简介: 周 明(1982—), 博士研究生, 主要从事多个波长激光损伤机理方面的研究。

E-mail: zhouting08@siom.ac.cn

导师简介: 邵建达(1964—), 研究员, 博士生导师, 主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: jdshao@opfilm.com

损伤坑半径增长系数和 1064 nm 激光单独作用引起的增长系数相似,两者形成的损伤坑半径增长均随着入射激光总能量变化。

本文建立了两个波长共同作用光学薄膜的损伤测量装置,初步研究 1064 nm,532 nm 两个波长激光共同作用下光学薄膜的损伤。选取 1064 nm,532 nm 激光入射均为高透射的三倍频分离膜样品,在同一样品的不同区域分别进行 1064 nm 激光,532 nm 激光以及 1064 nm 激光和 532 nm 激光共同作用 3 种方式辐照,保证了 3 种不同方式测量结果的可比性。实验结果表明,1064 nm 激光单独辐照薄膜的损伤阈值高于 532 nm 激光,而 1064 nm 和 532 nm 激光共同作用下薄膜的损伤阈值介于这两者之间。

2 实验装置

所用的激光器为基模(TEM₀₀)Nd:YAG 激光器,脉冲宽度为 12 ns,频率为 10 Hz。输出基频波长为 1064 nm,经过内置 KTP 晶体倍频后,形成偏振方向和 1064 nm 激光垂直的 532 nm 倍频激光。样品放置在一个由步进电机驱动的二维平台上,能量衰减系统由一个可旋转的半波片和一个偏振片组成,通过旋转半波片来调整入射到样品表面的激光能量。能量计用来记录每一个入射到样品的激光能量,He-Ne 激光器用来准直和帮助对损伤过程的实时监测。

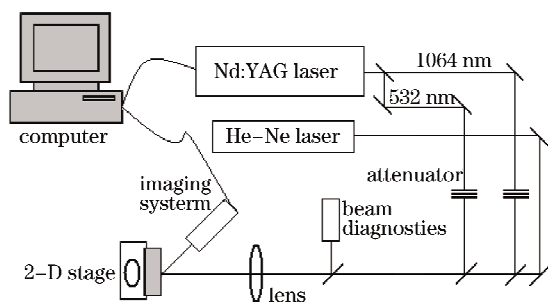


图 1 不同波长激光共同作用损伤阈值测试系统
Fig. 1 LIDT test system for combined irradiation of different wavelength beams

为测量不同波长激光共同作用光学薄膜的损伤阈值,首先必须分离 1064 nm 和 532 nm 波长激光,使得 1064 nm 和 532 nm 激光分别按图 1 所示光路传输,并使 1064 nm 和 532 nm 激光经过透镜并汇聚到样品同一位置上,两个波片组成的衰减系统分别测量两个人射激光能量值。采用 1-on-1 测量方式对样品进行激光损伤阈值(LIDT)测量。

3 实验过程

3.1 1064 nm 激光和 532 nm 激光单独对 TiO₂ 单层膜的损伤比较

首先研究 1064 nm 和 532 nm 激光单独辐照单层膜损伤阈值。采用电子束蒸发得到 TiO₂ 单层膜样品,基底为 K9 玻璃,TiO₂ 单层膜样品膜厚为 266 nm。在同一块样品上不同区域分别利用 1064 nm 激光和 532 nm 激光单独对 TiO₂ 单层膜进行 1-on-1 阈值测量。

图 2 为 1064 nm 激光和 532 nm 激光单独对 TiO₂ 单层膜的损伤阈值数据对比,分别对其进行直线拟合。得到 532 nm 激光单独辐照下的阈值为 2.0 J/cm²,1064 nm 激光单独辐照下阈值为 4.4 J/cm²。结论显示 1064 nm 激光单独辐照 TiO₂ 单层膜的损伤阈值大于 532 nm 激光,其原因主要是长波长单光子能量较小,而短波长作用下光子能量大大加强,膜层表面缺陷在短波长作用下会比长波长作用吸收更多的光子能量从而转化为产生热破坏的能量,更易于产生破坏。

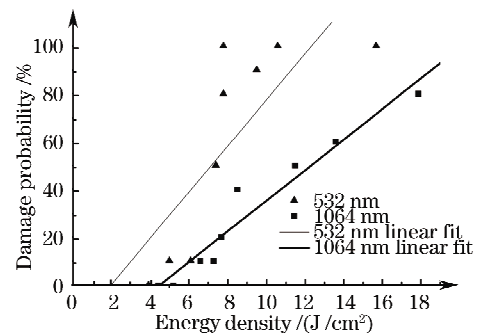


图 2 1064 nm,532 nm 激光对单层膜的损伤阈值
Fig. 2 LIDT of single film with 1064 nm pulse and 532 nm pulse

3.2 1064 nm 和 532 nm 激光共同作用损伤研究

为了更好地分析 1064 nm 和 532 nm 激光共同作用对薄膜损伤机理,需要入射激光在 1064 nm 和 532 nm 入射下有相同的反射或者透射特性。可选择 1064 nm 和 532 nm 入射下均高透射的薄膜。利用长波通周期膜系^[6,7]可实现这一要求,常见膜系结构为 G/(0.5 HL0.5 L)^N/A。其中 G 代表石英基底,A 为入射介质,N 为重复周期数。H 与 L 分别代表光学厚度为四分之一中心波长的高、低折射率材料。选取 H 为 HfO₂,L 为 SiO₂。HfO₂ 和 TiO₂ 材料具有熔点高、较高的牢固度和致密性的特点,均是具有较高损伤阈值的材料。采用镀膜基片

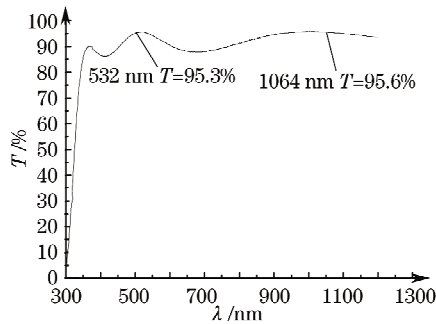


图3 1064 nm,532 nm ARF 透过率曲线
Fig. 3 Transmittance curve of 532 nm and 1064 nm ARF

为 $\phi 50$ mm 的 K9 玻璃,通过高真空电子束蒸发得到样品,在镀膜过程中选取监控波长为 351 nm。采用

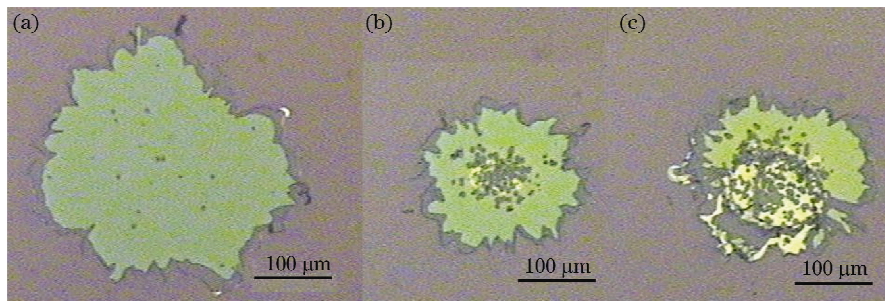


图4 3种不同方式辐照下样品典型损伤形貌图。(a)1064 nm;(b)532 nm;(c)1064 nm+532 nm
Fig. 4 Typical morphology maps of the samples which are irradiated by three different ways. (a) 1064 nm; (b) 532 nm; (c)1064 nm+532 nm

图4(a),(b),(c)分别是1064 nm激光,532 nm激光,1064 nm和532 nm激光共同作用下的损伤形貌,其辐照的激光总能量密度分别为 9.5 J/cm^2 , 7.8 J/cm^2 , 8.2 J/cm^2 。从图4中可看出,1064 nm激光和532 nm激光单独辐照形成的损伤形貌明显不同,相比1064 nm激光单独作用,532 nm激光更多地表现为穿透性损伤。而1064 nm激光和532 nm激光共同作用下损伤形貌和532 nm激光单独作用形貌相似,可见在1064 nm和532 nm激光共同作用下样品引发损伤的因素中,532 nm激光诱发的薄膜损伤起主导作用^[8,9]。选取3块相同膜系和工艺样品按上文所述方法分别进行测试,样品1所测得损伤概率及其对应能量密度有效数据放在同一个图中,其结果如图5所示。

图5给出了样品1在1064 nm激光,532 nm激光,1064 nm和532 nm激光共同作用下激光的能量密度及对应损伤概率数据。从图5中可看出,对1064 nm和532 nm增透薄膜,1064 nm激光作用下增透膜损伤阈值仍然高于532 nm激光,与1064 nm

Lamba-900 分光光度计测得其光谱曲线如图3所示,所得到的样品在532 nm和1064 nm处透射率均达到95%以上。

在采用1064 nm激光和532 nm激光共同辐照样品时,利用刀口法分别测量了两束激光的光斑面积,得到1064 nm激光单独辐照到样品上的光斑面积为 $1.4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$,532 nm激光单独辐照到样品上的光斑面积为 $6.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ 。在同一块样品上分别采用1064 nm激光,532 nm激光以及在532 nm波长激光中额外加入1064 nm激光这3种方式进行损伤阈值测量。在莱卡显微镜下观察这3种不同的辐照方式在样品表面形成典型损伤形貌(100倍),如图4所示。

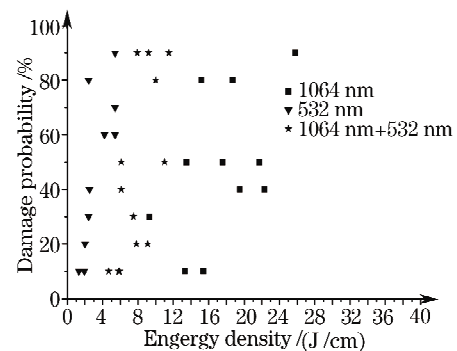


图5 3种方式辐照下激光能量密度及对应的损伤概率
Fig. 5 Damage probability with the energy density of the samples

激光和532 nm激光分别作用于 TiO_2 单层膜的结论一致,而1064 nm和532 nm激光共同作用下损伤数据点介于1064 nm激光和532 nm激光单独作用数据之间。分别对这3种方式辐照1064 nm,532 nm增透膜下的能量密度及其对应的损伤发生的概率数据进行直线拟合,得到样品1,2,3按照3种方式辐照样品拟合的损伤阈值如表1所示。

表 1 3 种方式辐照样品的损伤阈值
Table 1 LIDT of the samples which irradiated by three ways

Sample	LIDT under	LIDT under	LIDT under
	1064nm laser irradiation /(J/cm ²)	532nm laser irradiation /(J/cm ²)	1064nm+532nm laser irradiation /(J/cm ²)
1	3.8	2.2	3.2
2	6.7	2.5	4.2
3	5.0	1.9	3.5

对长脉冲激光辐照薄膜而言,缺陷和杂质对激光能量的吸收引起的温度变化是导致其损伤发生的主要原因^[10~15]。假设激光辐照范围内存在一个球形杂质,对单个波长的激光入射,杂质对激光的能量吸收为 $Q = 3\sigma I/4\pi a^2$,其中 σ 为吸收截面, a 为杂质半径, I 为激光的能量密度。当杂质半径 a 远小于入射激光波长 λ 时,有^[14]

$$\sigma \approx 24n\pi a I m [n^2 / (\epsilon + 2n^2)] / \lambda, \quad (1)$$

式中 ϵ 是杂质的介电常数, m 为杂质的消光系数, n 为介质材料的折射率。当杂质半径 a 接近入射激光波长 λ 时,可根据米氏吸收理论得到吸收截面 σ 与杂质半径 a 的关系。因此对不同波长 λ 激光而言存在不同半径的敏感杂质^[16],这些敏感杂质是诱导温升以及损伤发生的主要因素。两个不同波长激光同时辐照薄膜与单个波长激光相比,在脉冲激光辐照的范围内诱导损伤的敏感杂质及其数量会发生变化,从而使得 1064 nm 和 532 nm 激光共同辐照薄膜与 1064 nm 激光或者 532 nm 激光单独辐照薄膜相比产生不同的损伤阈值。

4 结 论

薄膜本身的特性^[17]和镀膜工艺、材料等因素,对薄膜的抗激光损伤能力有很大影响。本文建立了两个不同波长激光同时辐照薄膜的损伤测试装置,在同一样品的不同区域分别进行 1064 nm 激光,532 nm 激光以及 1064 nm 激光和 532 nm 激光共同作用 3 种方式辐照,保证了 3 种不同方式测量结果的可比性。首先研究 1064 nm 激光,532 nm 激光单独辐照 TiO₂ 单层膜的损伤阈值,然后分析 1064 nm 激光,532 nm 激光和在 532 nm 激光中加入 1064 nm 激光这 3 种不同方式辐照 1064 nm 和 532 nm 增透薄膜所产生的损伤形貌及其损伤阈值。

实验研究结果表明,1064 nm 和 532 nm 激光共同作用引起的损伤形貌和 532 nm 激光单独作用下引起损伤形貌相似,532 nm 激光在诱发薄膜损伤因素中起主导作用。1064 nm 激光单独辐照薄膜的损

伤阈值要高于 532 nm 激光,而 1064 nm 和 532 nm 激光共同作用下薄膜的损伤阈值介于这两者之间。目前对多个波长激光共同作用下薄膜的损伤阈值测量仍无相关的评价标准,如何建立一个有效的评价标准,以及更好地解释多个波长激光共同作用损伤实验中出现的现象,是我们研究工作的下一个目标。

参 考 文 献

- Li Liangyu, Wang Si, Wang Fan. Design of limitation and location system in ICF[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1): 107~109
- 李良钰,王 仕,王 番. ICF 瞄准定位系统的设计[J]. *光子学报*, 2002, **31**(1): 107~109
- Wang Gancang. A brief review of the progress of laser inertial confinement fusion in recent years [J]. *Chinese J. Nuclear Science and Engineering*, 1997, **17**(3): 266~269
- 王淦昌. 激光惯性约束核聚变(ICF)最新进展简述[J]. *核科学与工程*, 1997, **17**(3): 266~269
- Ma Xiaofeng, Zhang Dongping, Wang Yingjian. Fabrication and properties study of harmonic beam splitter at 1064 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 835~838
- 马小凤,张东平,王英剑. 1064 nm 倍频波长分离膜的制备与性能研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 835~838
- A. N. Mary, E. D. Eugene. Growth of laser damage in SiO₂ under multiple wavelength irradiation[C]. *SPIE*, 2005, **5991**: 1~12
- C. W. Carr, J. M. Auerbach. Effect of multiple wavelengths on laser-induced damage in KII_(2-x)DxPO₄ crystal[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(5): 595~597
- II. A. MacIod. Thin Film Optical Filters[M]. London: Institute of Physics Publishing, 1986. 158~177
- Shang Guangqiang, Zhan Meiqiong, He Hongbo. Fabrication and properties of third harmonic beam splitter[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(4): 580~582
- 尚光强,占美琼,贺洪波. 1053, 527, 351 nm 倍频分离膜的制备与性能研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(4): 580~582
- L. Lamaignerel, S. Reyne. Effects of wavelengths combination on initiation and growth of laser induced surface damage in SiO₂ [C]. *SPIE*, 2007, **6720**: 1~9
- P. Demange, R. A. Negres. Understanding and predicting the damage performance of KD_xH_{2-x}PO₄ crystals under simultaneous exposure to 532 nm and 355 nm pulses[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(18): 19221~19223
- Wang Tao, Zhao Yuanan, Huang Jianbin. Accumulation effect of multi-shot laser-induced damage to optical coatings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 859~862
- 王 涛,赵元安,黄建兵. 多脉冲激光作用下光学薄膜损伤的累积效应[J]. *光子学报*, 2006, **35**(6): 859~862
- Zhao Yuanan, Wang Tao. Pulsed laser induced damage model of

- optical coatings with absorbing inclusion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1372~1375
- 赵元安,王 涛,张东平. 脉冲激光辐照光学薄膜的缺陷损伤模型[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1372~1375
- 12 Weidong Gao, Tao Wang, Yuanan Zhao. Damage on $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high-reflecting coatings under single and multiple Nd:YAG laser pulse irradiation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(3): 179~180
- 13 Hu Haiyang, Fan Zhengxiu, Liu Ye. Effect of impurities on laser induced damage to 1.06 μm optical coatings[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(6): 489~492
- 胡海洋,范正修,刘 晔. 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
- 14 Xu Cheng, Dong Hongcheng, Xiao Qiling *et al.*. Optical properties and laser-induced damage threshold of Ta_2O_5 films deposited by different methods[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1595~1599
- 许 程,董洪成,肖祁陵 等. 不同方法制备的 Ta_2O_5 薄膜光学性能和激光损伤阈值的对比分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1595~1599
- 15 Li Dawei, Xu Chen, Zhao Yuanan *et al.*. Delamination of optical thin films induced by 1064 nm laser pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 764~767
- 李大伟,许 程,赵元安 等. 1064 nm 激光脉冲致光学薄膜分层剥落损伤特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 764~767
- 16 M. D. Feit, A. M. Rubenchik. Implications of nanoabsorber initiators for damage probability curves, pulselength scaling and laser conditioning [C]. *SPIE*, 2004, **5273**: 74~80
- 17 Fan Zhenxiu, Tang Xuefei. Temperature field design in optical films[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(4): 463~467
- 范正修,汤雪飞. 光学薄膜的温度场设计[J]. *光学学报*, 1995, **15**(4): 463~467