

# 界面连续性对薄膜节瘤损伤特性的影响

何文彦<sup>1,2</sup> 程鑫彬<sup>1,2</sup> 马彬<sup>1,2</sup> 丁涛<sup>1,2</sup> 叶晓雯<sup>1,2</sup> 张锦龙<sup>1,2</sup> 张艳云<sup>1,2</sup>  
焦宏飞<sup>1,2</sup> 王占山<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>上海同济大学物理系精密光学仪器研究所, 上海 200092; <sup>2</sup>特殊人工微结构材料上海重点实验室, 上海 200092)

**摘要** 研究了 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 高反膜中植入 2 μm 的 SiO<sub>2</sub> 小球所形成的节瘤的界面连续性对损伤特性的影响。采用离子束辅助沉积(IAD)技术制备了两种不同厚度的 1064 nm 高反膜。它们的电场分布和吸收相近;但是厚度大(约为 2 倍)的薄膜中,节瘤的界面连续性更好。对于这两种特性的节瘤,用 1064 nm 脉冲激光(脉宽 10 ns)进行了统计性的 Raster Scan 扫描测量。发现厚度大的薄膜中节瘤的初始损伤阈值更高(约为 2 倍),损伤过程相对缓慢。说明对于 2 μm 直径的 SiO<sub>2</sub> 种子源,在考察的厚度范围内,节瘤与周围膜层的连续性随着膜层厚度的增加明显改善,其抗激光辐照的稳定性也增强,初始损伤阈值随之提高。

**关键词** 薄膜;节瘤;界面连续性;激光损伤

**中图分类号** O484.4; N27

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201138.s107002

## Influence of the Interface-Continuity on the Damaging Characteristics of Nodular Defects

He Wenyan<sup>1,2</sup> Cheng Xinbin<sup>1,2</sup> Ma Bin<sup>1,2</sup> Ding Tao<sup>1,2</sup> Ye Xiaowen<sup>1,2</sup>  
Zhang Jinlong<sup>1,2</sup> Zhang Yanyun<sup>1,2</sup> Jiao Hongfeng<sup>1,2</sup> Wang Zhanshan<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Precision Optical Engineering, Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)  
(<sup>2</sup>Shanghai Key Laboratory of Special Artificial Microstructure Materials and Technology, Shanghai 200092, China)

**Abstract** The influence of interface-continuity of nodules that initiate from 2 μm SiO<sub>2</sub> particles on the damaging behaviors of HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> high reflective coatings is discussed. Two kinds of films with different thickness are manufactured using ion-assistant deposition (IAD) technique. These films have similar distribution of electronic field and absorption; however, the film with larger thickness (double times) has better interface-continuity. The two kinds of films with engineered defects are irradiated by the 1064 nm(10 ns) laser pulse in the way of raster scan. It is found that the nodules in thicker films had higher initial damage threshold and the damage process is relatively slower. It is shown that for the SiO<sub>2</sub> particle with diameter of 2 μm, the continuity of the interface between the nodular defects and surrounding layers become better with the increasing film's thickness, and its resistance to the laser-irradiation also increased.

**Key words** thin films; nodular defects; interface-continuity; laser-induced damage

**OCIS codes** 310.1860; 310.4925; 310.6870; 350.1820

## 1 引言

随着固体激光器的突破性发展和激光约束核聚变计划的开展,激光器的输出能量不断提高,这就对其所需的激光薄膜提出了更高的抗损伤要求<sup>[1~3]</sup>。而激光薄膜在纳秒级激光脉冲辐照下的损伤是一个

涉及多领域、多机理的复杂过程,总体上来说,是薄膜在高功率激光辐照下,通过本征吸收、非线性吸收<sup>[4,5]</sup>和缺陷吸收<sup>[6]</sup>把光能转化为热能,在热熔融或者热力耦合的作用下最终造成不可逆损伤的过程<sup>[7]</sup>。

对于 1064 nm(10 ns)的激光脉冲来说,HfO<sub>2</sub>/

**收稿日期:** 2011-07-15; **收到修改稿日期:** 2011-08-31

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金(61108036)资助课题。

**作者简介:** 何文彦(1985—),男,硕士研究生,主要从事可见光近红外薄膜应用方面的研究。

E-mail: Winzer.HE@hotmail.com

**导师简介:** 王占山(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事极紫外、可见光及近红外薄膜和光学系统等方面的研究。

E-mail: wangzs@tongji.edu.cn

SiO<sub>2</sub> 组合是目前最佳的高反射多层膜制备材料。在 1064 nm 激光脉冲辐照下,缺陷尤其是节瘤缺陷对薄膜损伤起主要影响,是限制薄膜阈值的主要因素<sup>[8~10]</sup>。由于种子源的存在,节瘤与无缺陷薄膜的交界面上存在膜层断裂的现象,造成了较大的空隙,使相关的力学稳定性变差<sup>[11, 12]</sup>。在激光辐照下,由于膜层下的种子源受热形变而对周围产生力学效应,该稳定性较差的节瘤界面在这个热力共同作用下极易损坏,种子源与节瘤喷溅出薄膜,在薄膜上留下火山坑状的形貌<sup>[13]</sup>。因此,节瘤与无缺陷薄膜的界面连续性对薄膜节瘤的损伤产生较大影响。本文通过对人工植入了同样粒径的 SiO<sub>2</sub> 小球而形成的节瘤进行了统计性的 Raster Scan 扫描测试,显示出随着膜厚的增加,界面处的断层和空隙会逐渐被修补成为连续、致密的连续膜层,增强了节瘤抵抗激光损伤的能力,证明在 1064 nm(10 ns)辐照下薄膜节瘤缺陷界面连续性的好坏对节瘤损伤具有较大影响。

## 2 实验条件与准备

### 2.1 样品的制备

实验是在熔石英基板上植入直径为 2 μm 的 SiO<sub>2</sub> 小球,使用日本光驰(OPTORUN)公司的 OTFC-1800 型号真空镀膜机,运用离子束辅助沉积(IAD)技术制备了两种厚度不同的 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 高

反膜,在 1064 nm 处反射率都大于 99.8%。样品 1 的膜系为(HL)<sup>12</sup>L(膜厚约 4 μm),样品 2 的膜系为(HL)<sup>24</sup>L(膜厚约 8 μm)。

### 2.2 节瘤损伤测试

实验采用 1064 nm 脉冲激光(脉宽 10 ns, 10 Hz)进行 Raster Scan 方式的损伤测试。激光测试能量从 5 J/cm<sup>2</sup> 开始,增幅为 2.5 J/cm<sup>2</sup>,扫描范围为 0.2 mm×0.2 mm。每一能量级连续扫描两次后,用 Normaski 显微镜对扫描区域的薄膜节瘤进行观察并统计,直到损伤生长或者扫描区域内的节瘤全部喷溅而出为止。

## 3 检测结果与分析

### 3.1 节瘤缺陷的几何特征

两种节瘤的形貌如图 1 所示。从样品 1 和样品 2 的聚焦离子束刻蚀(FIB)检测图像[图 1(a)和(b)]的对比中,可以看出样品 1 的节瘤与无缺陷区域交界面的连续性整体都很差,空隙较多且大;而样品 2 的界面虽然在靠近基板的膜层中也存在空隙,但是越靠近膜面,薄膜越致密、空隙越少,到邻近膜面时,界面变为连续。由此可见,样品 2 的界面连续性较样品 1 好;随着膜厚的增加,由种子源造成的薄膜空隙会被填补。

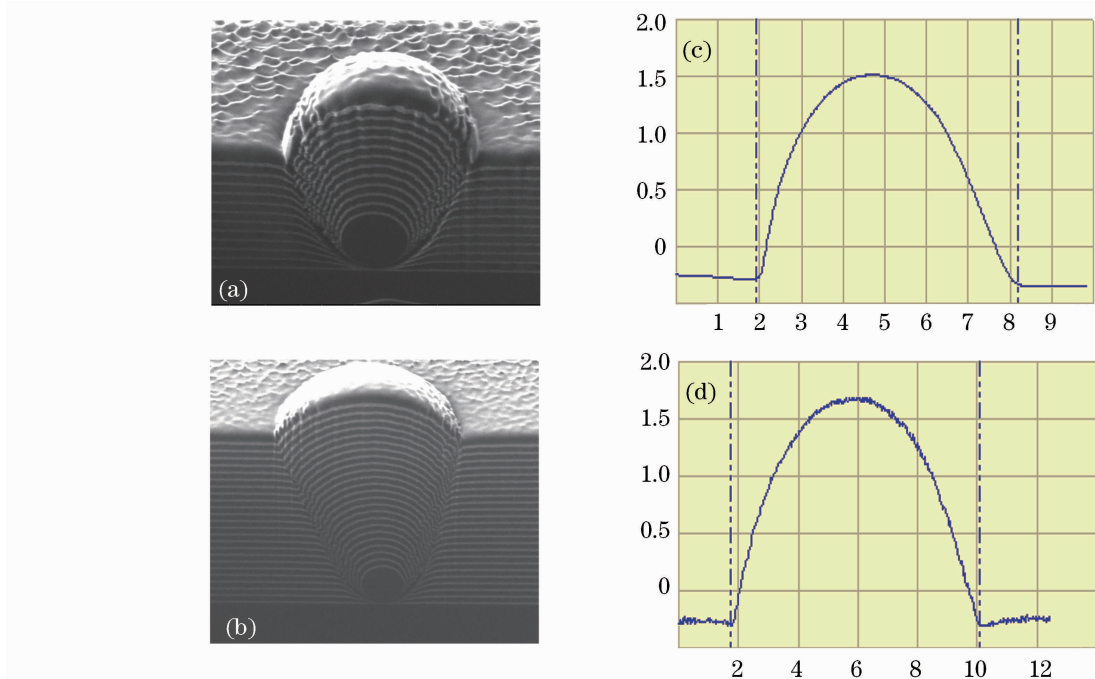


图 1 两种节瘤的 FIB 截面与 AFM 测试截面图像

Fig. 1 Cross-section images of two kinds of nodules taken by FIB and AFM

如图 1(c)和(d)所示,原子力显微镜(AFM)对节瘤界面的检测结果也说明厚度较大的薄膜对节瘤中的空隙有一定的补偿作用。样品 1 中节瘤的高度约为  $1.8 \mu\text{m}$ ,直径为  $7.2\sim 7.8 \mu\text{m}$  之间;样品 2 的节瘤高度约为  $1.85 \mu\text{m}$ ,直径为  $9.8\sim 10.6 \mu\text{m}$  之间。用节瘤直径的平方除以膜厚与节瘤高度的乘积,可以得到节瘤的特征参数<sup>[12,14]</sup>;样品 1 约为 5.6,大于样品 2 的特征参数为 4.5 左右。

### 3.2 节瘤损伤特性及分析

通过统计性的 Raster Scan 扫描测试发现,样品 1 中的节瘤在能量为  $15 \text{ J/cm}^2$  的激光辐照下就开始出现损伤,节瘤一次性喷出形成火山坑状凹坑;而样品 2 中节瘤的初始损伤阈值为  $35 \text{ J/cm}^2$ ,而且其中一部分节瘤的损伤过程较为缓慢,如图 2 所示,节

瘤 b 在承受了  $40 \text{ J/cm}^2$  的激光辐照后,部分损伤(不同于完好节瘤 c),直到  $50 \text{ J/cm}^2$  时才完全损伤。这可能是样品 2 中的节瘤在表面膜层被激光损伤以后,在亚表面形成了一个力学亚稳态,故而减缓了损伤生长。

两种薄膜具有相似的电场分布,如图 3 所示,显示了样品 1、2 膜层中的电场分布。激光能量在距离薄膜表面  $3 \mu\text{m}$  处几乎衰减为零。而且同一 IAD 制作工艺下,两个样品的吸收系数相近。因此在这两种薄膜中,电场受同一大小种子源影响也会具有相似的改变,薄膜本征吸收也会相近。由光热共路干涉仪(SPTS)测得,样品 1 的弱吸收值为  $1.9 \times 10^{-5}$ ,样品 2 的为  $2.1 \times 10^{-5}$ ,也说明这一点。

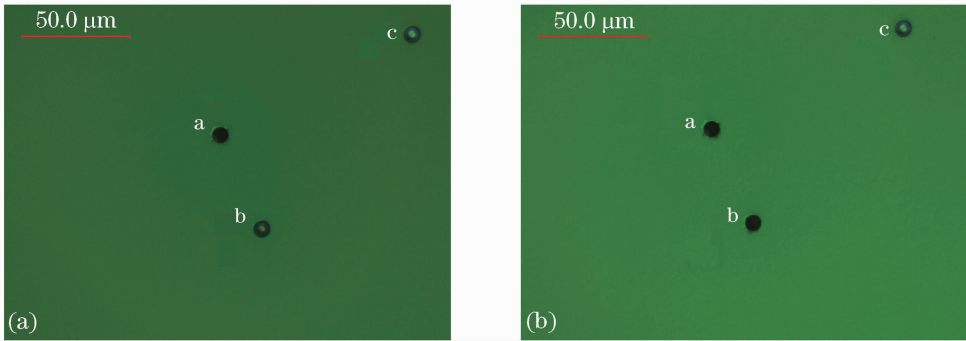


图 2 样品 2 在不同激光能量辐照下损伤形貌照片。激光能量为 (a)  $40 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $50 \text{ J/cm}^2$

Fig. 2 Damage morphologies of sample 2 irradiated by laser with different energies. Irradiated by laser of (a)  $40 \text{ J/cm}^2$  and (b)  $50 \text{ J/cm}^2$

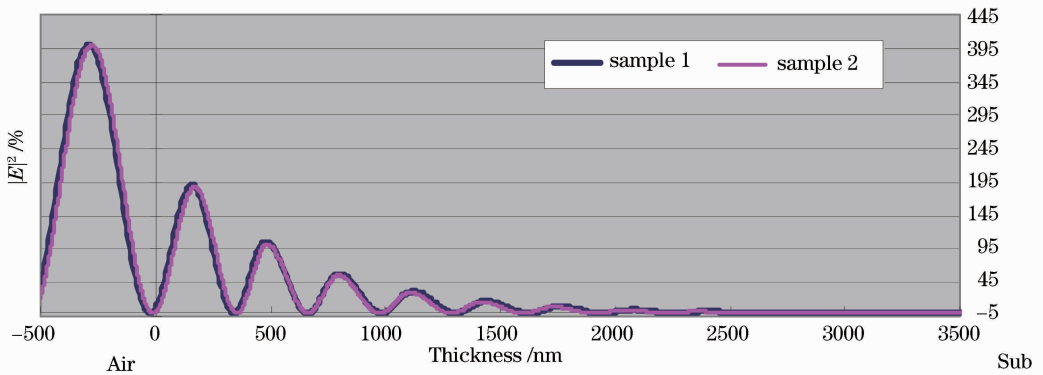


图 3 模拟两种薄膜中电场分布图

Fig. 3 Distributions of the electronic field in two kinds of film

由于制备工艺相同使薄膜吸收系数近似,膜系类似导致了薄膜中电场分布相近,仅有影响节瘤力学稳定性的界面连续性差别较大,说明界面连续性对薄膜损伤特性影响较大。

## 4 结 论

本文通过离子束辅助沉积制备了两种不同膜厚

的薄膜中的节瘤缺陷,采用聚焦离子束刻蚀检测、原子力显微镜、光热共路干涉仪及电场模拟手段进行了比较,显示出两者吸收系数、电场分布相近,仅是节瘤与薄膜无缺陷膜层的交界面的连续性存在较大差异;并且对两种薄膜上的节瘤进行了统计性的 Raster Scan 测试。实验结果证明,具有更好界面连续性的节瘤能承受更高能量的激光辐照,损伤生长

过程也较为缓慢,具有更好的抗激光损伤能力。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Qiming. Breakthroughs and developments of semiconductor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2190~2197  
王启明. 中国半导体激光器的历次突破与发展[J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2190~2197
- 2 Jiang Zhonghong, Yang Zhongmin. Progress on research and development of laser glass in China[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2198~2201  
姜中宏, 杨中民. 中国激光玻璃研究进展[J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2198~2201
- 3 Lin Zunqi. Progress of laser fusion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2202~2207  
林尊琪. 激光核聚变的发展[J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2202~2207
- 4 N. Bloembergen. Laser-induced electric breakdown in solids[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1974, **QE-10**(3): 375~386
- 5 A. S. Epifanov, A. A. Manenkov, A. M. Prokhorov. Theory of avalanche ionization induced in transparent dielectrics by all electromagnetic field [J]. *Sov. Phys. JEPT*, 1979, **42**(2): 377~382
- 6 R. W. Hopper, D. R. Uhlmann. Mechanism of inclusion damage in laser glass [J]. *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**(10): 4023~4037
- 7 He Hongbo. Laser-Induced Damage of High Power Laser Coatings[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004. 12~24  
贺洪波. 高功率激光薄膜的损伤研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密仪器研究所, 2004. 12~24
- 8 M. C. Staggs, M. Balooch, M. R. Kozlowski *et al.*. In-situ atomic-force microscopy of laser-conditioned and laser-damaged HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> dielectric mirror coatings[C]. *SPIE*, 1992, **1624**: 375~385
- 9 M. R. Kozlowski, R. Chow. Role of defects in laser damage of multilayer coatings[C]. *SPIE*, 1994, **2114**: 640~649
- 10 A. M. Ledger. Inhomogeneous interface laser mirror coatings [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(17): 2979~2989
- 11 J. F. DeFord, M. R. Kozolowski. Modeling of electric field enhancements at nodular defect in dielectric multilayer coatings [C]. *SPIE*, 1993, **1848**: 455~473
- 12 R. J. Tench, R. Chow, M. R. Kozlowski. Characterization of defect geometries in multilayer optical coatings[C]. *SPIE*, 1994, **2114**: 415~425
- 13 Xinbin Cheng, Zhengxiang Shen, Hongfei Jiao *et al.*. Laser damage study of nodules in electron-beam-evaporated HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> high reflectors[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(9): C357~C363
- 14 Yongguang Shan, Hongbo He, Chaoyang Wei *et al.*. Geometrical characteristics and damage morphology of nodules grown from artificial seeds in multilayer coating[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(22): 4290~4295

栏目编辑: 韩 峰