

文章编号: 0253-2239(2007)06-1129-6

三倍频分光膜在 1064 nm 的破斑特性研究

崔 云^{1,2} 赵元安¹ 晋云霞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, 上海 201800)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 采用电子束蒸发方式制备了两种不同材料组合的分光膜, 分别对其在波长 1064 nm 激光辐照下的损伤阈值进行了测试, 用 Alpha-Step 500 台阶仪对破斑进行了深度测量。实验结果表明, 破斑呈现出表面层的剥落和深坑破坏两种形态。表面层的剥落深度在一定范围内不随能量密度的变化而变化; 深坑破坏深浅不一, 是膜内缺陷融化、汽化及喷发的综合作用的结果, 是损伤阈值降低的主要原因。

关键词: 薄膜光学; 激光损伤阈值; 破斑深度; 缺陷

中图分类号: O484 文献标识码: A

Laser Damage Characteristic of Third Harmonic Separator at 1064 nm

Cui Yun^{1,2} Zhao Yuan'an¹ Jin Yunxia¹ Fan Zhengxiu¹ Shao Jianda¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 10039)

Abstract: The two kinds of 3ω harmonic separator were prepared by electron beam evaporation with different materials. Laser induced damage threshold (LIDT) was measured at 1064 nm and the damage morphologies were mapped by Alpha-Step 500 meter. It was found that there are two different damage geometries: shallow denudation and deep crater. Shallow denudation in a certain range had same depth at different energy fluences, and material was removed from the top film layers. Deep crater had different depths caused by the combination of melting vaporization and fracture of inner defects of coatings, which was the main cause for decreased damage threshold.

Key words: thin-film optics; laser induced damage threshold; damage depth; defect

1 引 言

影响薄膜激光损伤阈值的因素有很多, 包括基底、镀膜材料、膜层组合、所用的沉积工艺、镀膜前基底的预处理及所用的强激光参量等^[1], 已有一些文献做过相应的报道。Fournet C^[2], Fan Z X^[3] 和 Giulio M Di^[4] 对交替沉积 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 薄膜的损伤阈值及损伤形貌进行了研究; 胡建平等^[5] 对氧化物薄膜抗 1064 nm 脉冲激光损伤的特性进行了研究; 凌秀兰等^[6] 对缺陷的种类、特点及成因进行了介绍, Duthler J, 赵元安等^[7,8] 对激光辐照光学薄膜的缺陷损伤模型进行了研究。

355 nm 分光膜是激光系统中一种重要的光学元件, 其光学性能为在 355 nm 处高反射, 在 532 nm

和 1064 nm 处高透射。实际使用中, 除了对 355 nm 的阈值有要求外, 对位于透射区 1064 nm 的阈值也有一定的要求。本文对 1064 nm 处的损伤阈值及破斑进行了研究, 研究了具有相似光谱特性而膜系结构不同的光学薄膜的损伤阈值和破斑情况。

2 薄膜制备及光学性能

采用电子束蒸镀工艺制备了两种膜系结构的三倍频分离膜, 每种膜系制备两次。一种膜系为 $\text{Sub} | (\text{HL})^{12} 3\text{H}2\text{U}2\text{L} | \text{Air}$, 其中 Sub 为基底, H 为 HfO_2 , L 为 SiO_2 , U 为 Al_2O_3 , 镀制的样品为 A 系列; 另一种膜系为 $\text{Sub} | (\text{HL})^8 (\text{UF})^8 2\text{H}2\text{U}2\text{L} | \text{Air}$, 其中 F 为 MgF_2 , 镀制的样品为 B 系列。两种膜的

作者简介: 崔 云(1978—), 女, 山西长治人, 博士研究生, 主要从事激光损伤方面的研究。E-mail: cuiyun@siom.ac.cn

导师简介: 邵建达(1964—), 男, 浙江宁波人, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光薄膜方面的研究。

E-mail: jdshao@opfilm.com

收稿日期: 2006-08-14; 收到修改稿日期: 2006-12-04

使用角度为 33.75°, 基底均采用 K9 玻璃, 制备条件相同。图 1、图 2 为两种薄膜样品的测量透射光谱曲线(测试仪器为分光光度计 Lamda900)和相应的

电场分布曲线。电场分布曲线是用软件 TFCalc 模拟的计算曲线与测量曲线基本吻合后算出的。

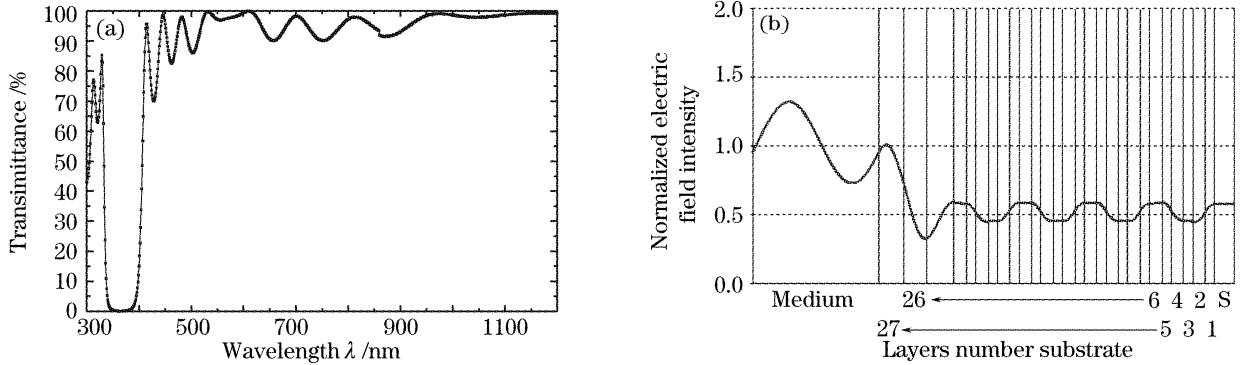


图 1 A 样品的测量光谱曲线(a), 电场分布曲线(b)

Fig.1 Measured optical transmittance (a) and electrical field intensity distribution of sample A (b)

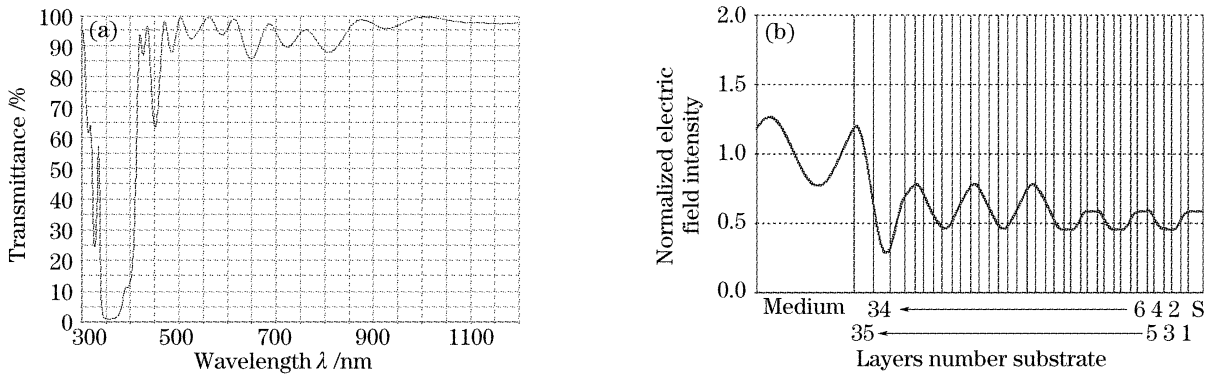


图 2 B 样品的测量光谱曲线(a), 电场分布曲线(b)

Fig.2 Measured optical transmittance (a) and electrical field intensity distribution of sample B (b)

从图中可以看出, 两种膜系结构的光学薄膜在 1064 nm 处的透射比均大于 97%, 表面层的电场强度较高。

损伤阈值定义为零几率损伤阈值, 判断标准为通过 Nomarski 显微镜放大 100 倍观察时膜层发生明显变化。测试结果如表 1 所示。

3 薄膜损伤阈值测试及结果

对 A、B 样品进行损伤测试, 各选 6 块, 编号为 A1、A2、A3、A4、A5、A6、B1、B2、B3、B4、B5、B6, 测试方法为 1-on-1, 激光输出波长为 1064 nm, 模式 TEM₀₀, 能量不稳定性为小于 ±5%, 脉冲宽度为 12 ns, 测试角度 33.75°, 激光光斑直径为 460 μm。

从表 1 中可以看出, B 系列的薄膜样品损伤阈值较高。

表 1 样品的损伤阈值

Table 1 Damage threshold of sample

4 破斑形貌及深度分析

在对薄膜破斑进行观察时发现存在两种破斑, 一种是较大面积的膜层剥离状破斑, 一种是面积较小的深坑状破斑。在阈值附近的破坏均为深坑状破斑, 说明较小的能量密度也能产生深坑状破斑。为了对这两种破斑进行定量分析, 按照能量密度的大小分别选取破斑点进行了深度分析。

4.1 膜层剥离状破斑形貌及深度分析

对 A 样品的膜层剥离状典型破斑进行了形貌观测[如图 3(a)所示]和对应的深度扫描[如图 3(b)所示]。破斑形貌为 Nomarski 显微镜放大 100 倍观察所得, 深度由 Alpha-Step 500 台阶仪(分辨力为 10⁻¹⁰ m)测得。从图中可以看出破斑周围有一些

Sample A	Threshold / (J · cm ⁻²)	Sample B	Threshold / (J · cm ⁻²)
A1	9.0	B1	15.0
A2	10.1	B2	16.0
A3	15.6	B3	19.0
A4	13.2	B4	17.9
A5	12.0	B5	16.1
A6	12.6	B6	18.7

点状薄膜的熔化物。

通过台阶仪的测量发现,PhotoA1 的破斑深度为 124 nm 和 244 nm,分别位于 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 界面处和

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2$ 界面处;PhotoA2 的破斑深度为 132 nm,位于 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 界面处;PhotoA3 的破斑深度为 255 nm,位于 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2$ 界面处;PhotoA4 的破斑

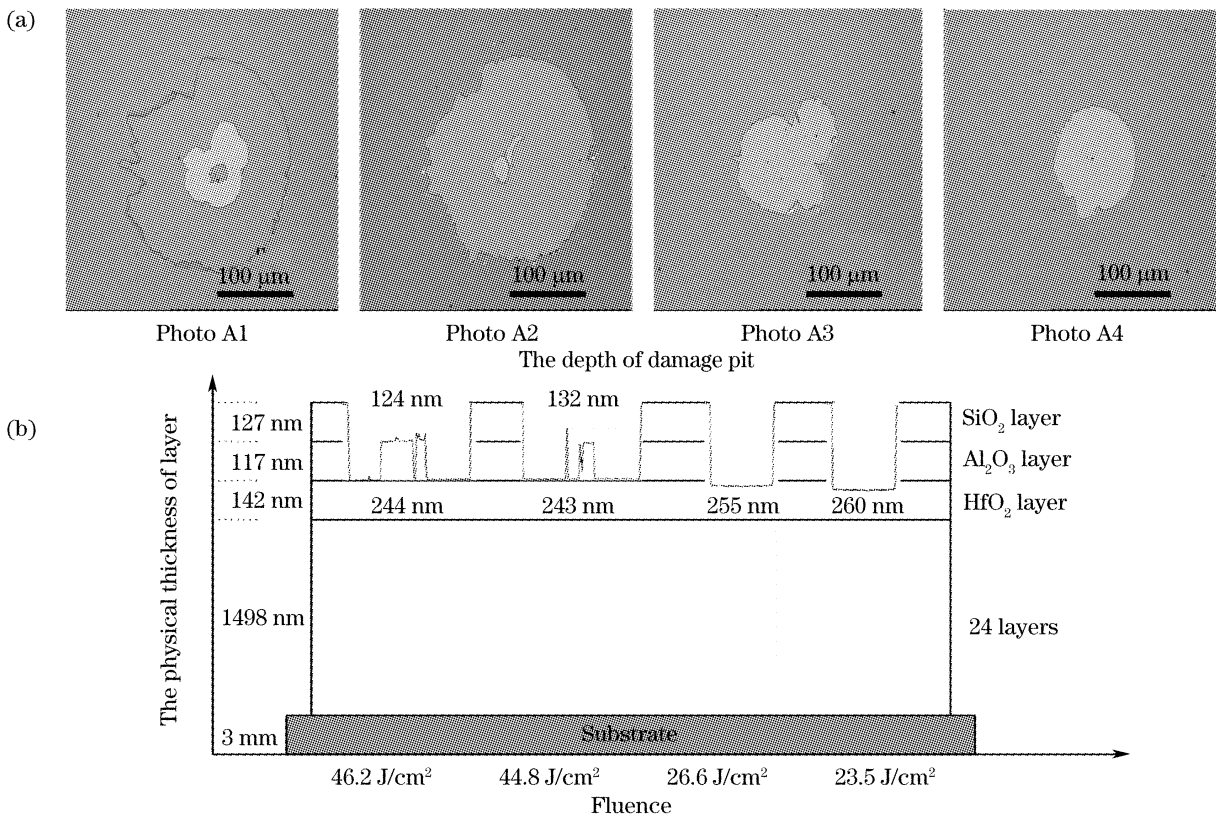


图 3 A 样品典型的膜层剥离状破斑形貌(a),深度分析(b)

Fig. 3 Shallow denudation morphologies (a) and depth (b) of sample A

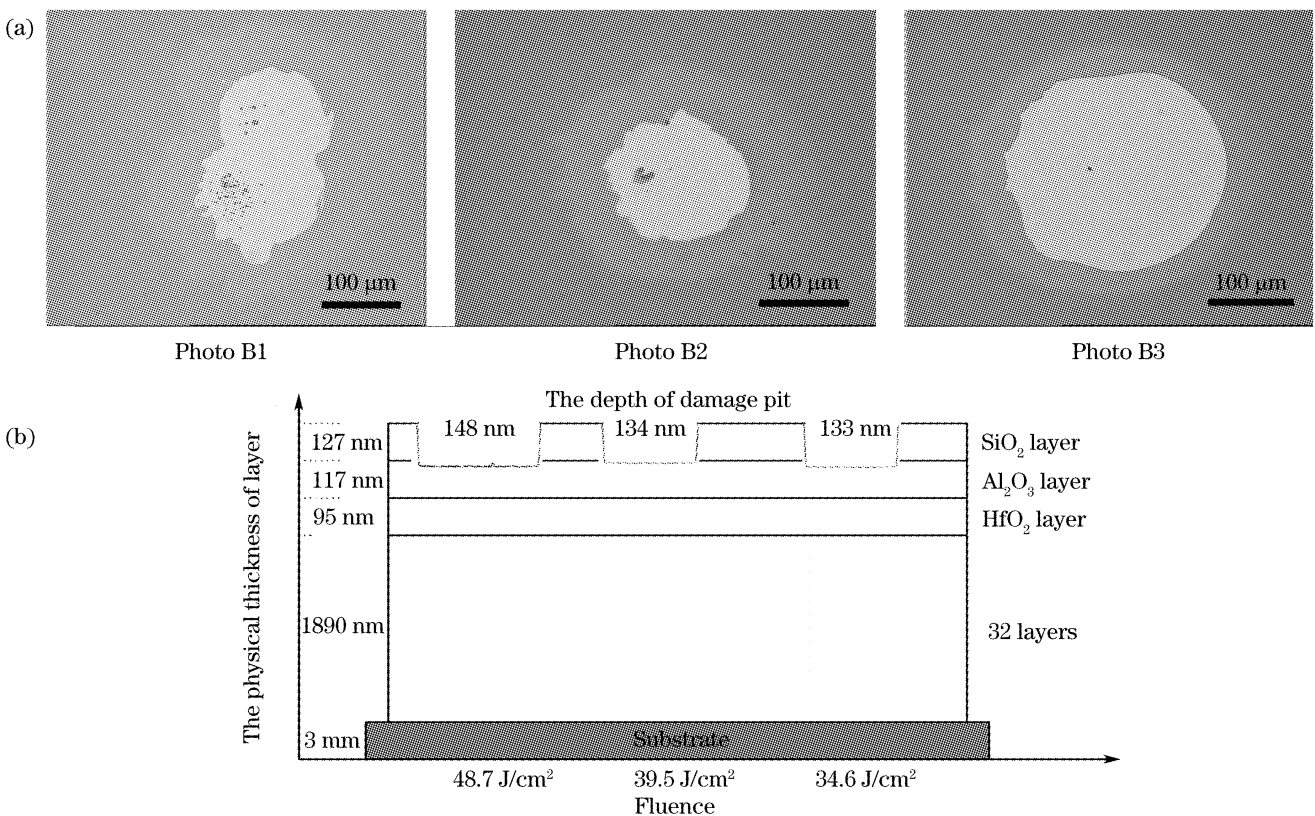


图 4 B 样品典型的膜层剥离状破斑形貌(a),深度分析(b)

Fig. 4 Shallow denudation morphologies (a) and depth (b) of sample B

深度为 260 nm, 位于 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2$ 界面处。从图中可以清楚地看出, 这些破坏大多为表面层 SiO_2 和 Al_2O_3 层的剥离, 破斑面积随着辐照激光能量的降低而减

小, 但破斑深度却不随激光能量的降低而减少。

对 B 样品的膜层剥离状典型破斑进行形貌观测[如图 4(a)所示]和深度扫描[如图 4(b)所示]。

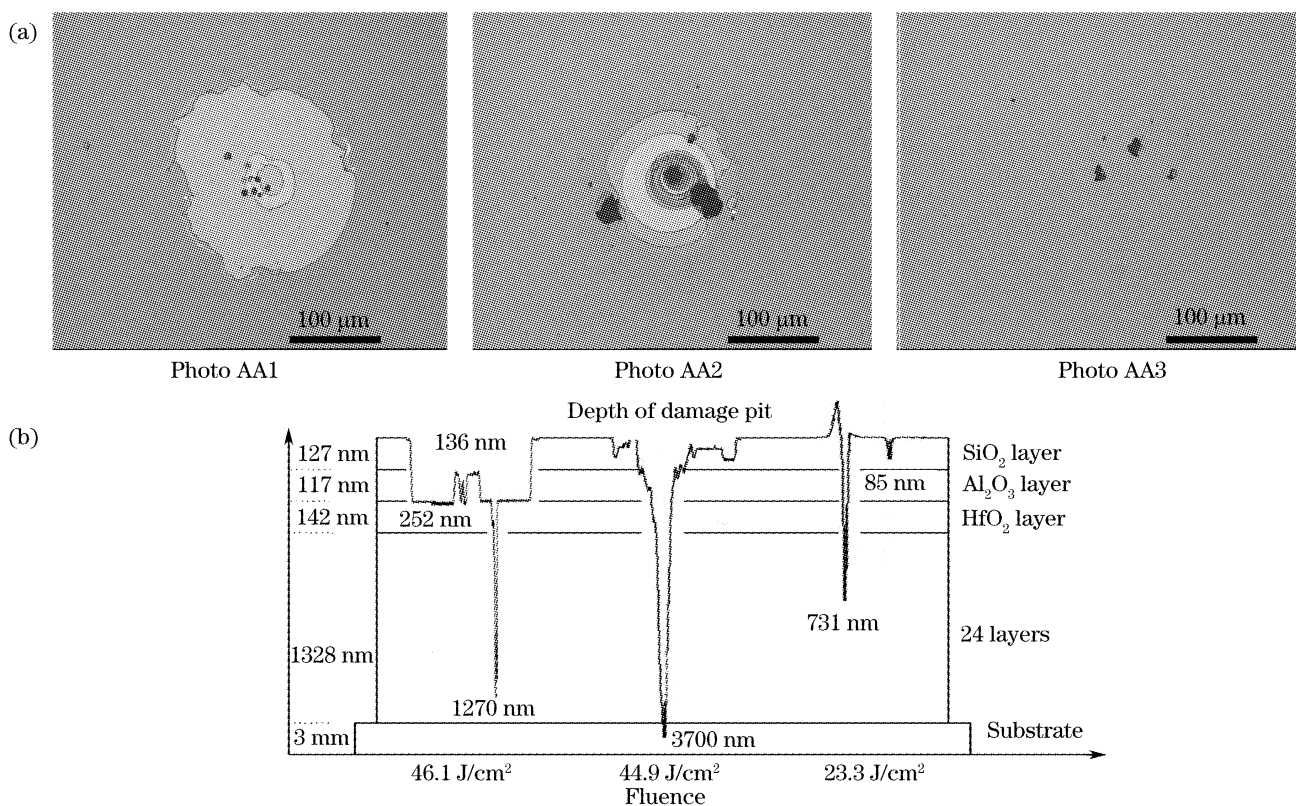


图 5 A 样品中的深坑状破斑形貌(a), 深度分析(b)
Fig. 5 Deep crater morphologies (a) and depth (b) of sample A

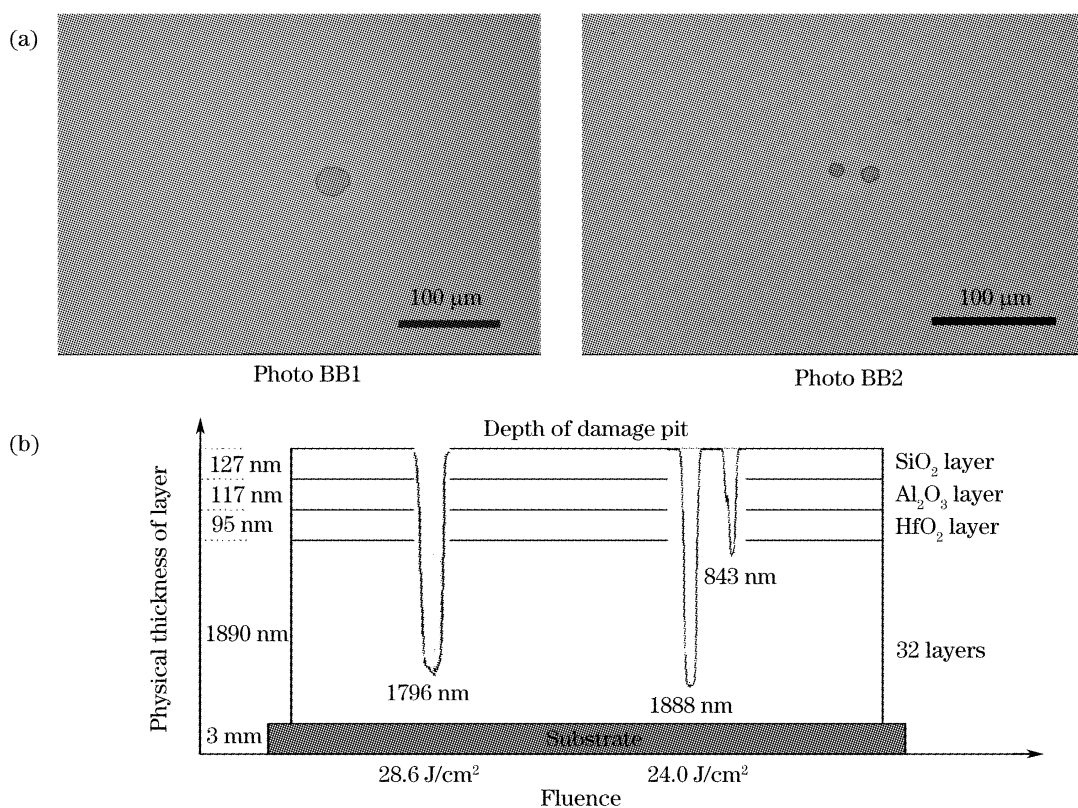


图 6 B 样品中的深坑状破斑形貌 (a), 深度分析(b)
Fig. 6 Deep crater morphologies (a) and depth (b) of sample B

通过台阶仪的测量发现, PhotoB1、PhotoB2、PhotoB3 的破斑深度均位于 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2$ 膜层的界面附近。从上面的测量可以看出, 这些破坏为表面层 SiO_2 的剥离, 破斑面积随着辐照激光能量的降低而减小, 深度不随激光能量的降低而减少。

4.2 深坑状破斑形貌及深度分析

从 A 样品中选取典型深坑状破斑并进行了观测[如图 5(a)所示]和深度扫描[如图 5(b)所示]。

通过台阶仪的测量发现, PhotoAA1 破斑深度为 1270 nm 的深度, PhotoAA3 破斑深度为 731 nm, 破斑的深度高低不等。

从 B 样品中选取典型深坑状破斑并进行了观测[如图 6(a)所示]和深度扫描[如图 6(b)所示]。

PhotoBB1 的破斑深度为 1796 nm, PhotoBB2

的破斑深度分别为 1888 nm 和 842.5 nm, 破斑的深度高低不等。

从对 A、B 样品深坑状破斑的测量可以看出, 这些破斑比剥离状破斑深的多, 且为喷射状, 应为缺陷吸收引起的破坏; 较低的激光能量都能引起薄膜很深的缺陷破坏, 这主要是由于缺陷的强吸收^[9,10]造成的。由于破斑深度和形状的影响, 台阶仪的探针不能保证到达各个角落, 因此只能进行定性分析。

为了分析清楚这些缺陷的具体成分, 使用扫描电镜对 A 样品中的 PhotoAA1 和 PhotoAA3 部分进行了成分分析, 如图 7 所示。

可以看出, 在薄膜中存在铷粒子, 成为缺陷吸收的源头; 另外一种缺陷源可能是在镀膜过程中的喷溅引起的。

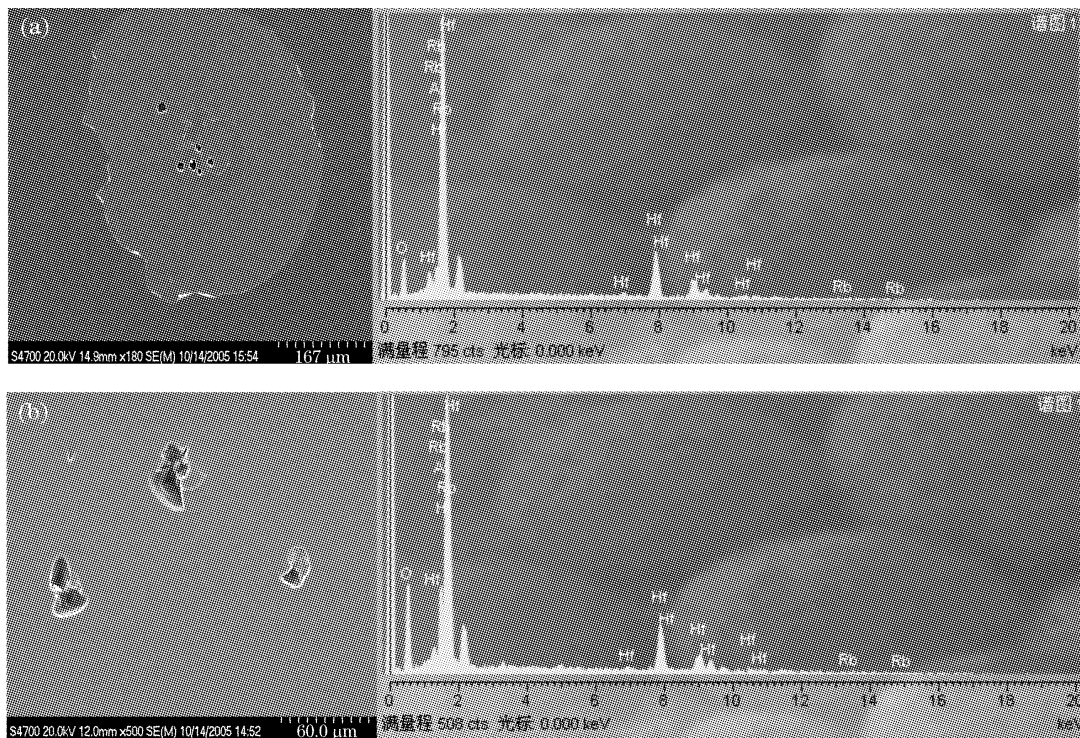


图 7 A 样品中 PhotoAA1 部分的电子散射谱(a), PhotoAA3 部分的电子散射谱(b)

Fig. 7 Electron dispersion spectrum at the area AA1 (a) and AA3 (b) of sample A

5 结 论

三倍频分光膜在基频处的破斑阈值与缺陷密切相关。研究发现, 三倍频分光膜在强激光辐照下膜层剥离状破斑深度较浅, 在一定范围内($23\sim 48 \text{ J/cm}^2$)不随能量的增加而变化; 深坑状破斑深度不一, 较小的激光能量密度就能使缺陷产生深坑喷发式破坏, 其中包含有复杂的力学过程和热学过程, 有文献表明缺陷破坏是材料融化和汽化及力的综合作用的结果^[11]。

通过以上分析可以发现:

在没有缺陷影响时, 破斑为膜层剥离状, 深度一般在膜层交界处;

在激光能量不足以使膜层剥离的情况下, 缺陷吸收也会损伤薄膜;

缺陷吸收能量汽化后产生高压, 对周围的薄膜产生压力而使薄膜产生张力, 当张力大于薄膜所能承受的最大应力时, 就会产生宏观上的力学破坏, 通常为深坑状破斑。

可见, 控制缺陷是提高薄膜损伤阈值的最有效手段。可采取扫描电镜(SEM)等方法对薄膜截面

进行观察,得到缺陷点的位置、大小及成分,从而对沉积方式和镀膜材料进行选择、对沉积参量进行优化,以减少缺陷,提高光学薄膜损伤阈值。

参 考 文 献

- 1 Liu Qiang, Lin Libin, Gan Rongbing *et al.*. Experiment study on the uniformity of damage threshold of oxide films[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(13): 1061~1064 (in Chinese)
刘 强,林理彬,甘荣兵等. 光学膜层激光损伤阈值均匀性的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(13): 1061~1064
- 2 C. Fournet, B. Pinot, B. Geenen *et al.*. High damage threshold mirror and polarizers in the ZrO_2/SiO_2 and HfO_2/SiO_2 dielectrics systems[C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1624**: 282~293
- 3 Zhengxiu Fan, Qiang Zhao, Hong Qiu *et al.*. Laser-induced damage in optical coating and laser condition technology [C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3244**: 469~474
- 4 M. Di Giulio, Marco Alvisi, Maria R. Perrone *et al.*. Laser damage testing of SiO_2 and HfO_2 thin film[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3738**: 337~346
- 5 Hu Jianping, Ma Zi, Li Wei *et al.*. 1064 nm pulse laser damage of oxide coatings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2): 262~266 (in Chinese)
- 胡建平,马 孜,李 伟等. 氧化物薄膜抗 1064 nm 脉冲激光损伤的特性研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(2): 262~266
- 6 Ling Xiulan, Huang Wei, Kong Mingdong *et al.*. Study on defects in optical thin film [J]. *Optical Instruments*, 2004, **26**(2): 178~182 (in Chinese)
凌秀兰,黄 伟,孔明东等. 激光薄膜缺陷研究[J]. *光学仪器*, 2004, **26**(2): 178~182
- 7 C. J. Duthler, M. Sparks. Extrinsic absorption in laser window materials[C]. *Proc. SPIE*, 1974, **414**: 219~226
- 8 Zhao Yuan'an, Wang Tao, Zhang Dongping *et al.*. Pulsed laser induced damage model of optical coating with absorbing inclusion [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1372~1375 (in Chinese)
赵元安,王 涛,张东平等. 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
- 9 J. Dijon, E. Quesnel, B. Rolland *et al.*. High damage threshold fluoride UV mirrors made by ion beam sputtering [C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3244**: 406~416
- 10 T. W. Walker, A. Vaidyanathan, A. H. Guenther. Impurity breakdown model in thin films[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **2966**: 283~291
- 11 S. Papernov, A. W. Schmid. High-spatial-resolution studies of UV-laser-damage morphology in SiO_2 thin films with artificial defecets[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5647**: 141~153