

基频反射膜元件表面等离子体烧蚀对 传输光束畸变的影响

陈惟肖^{1,2} 李大伟¹ 刘晓凤¹ 刘文文^{1,2} 方 周^{1,2} 张 蕾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 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 激光预处理后的高反膜表面会形成等离子体烧蚀, 等离子体烧蚀结构的存在会对传输光束的光强分布产生调制效应, 引起光束畸变。实验测试了 1064 nm 连续光束经过烧蚀样品后的光斑能量分布, 分析了产生调制的原因并讨论了这种调制效应随距离的变化情况, 为功能性损伤阈值判断及安全有效使用预处理样品提供依据。实验结果表明, 等离子体烧蚀结构中的锥形坑可引起峰值强度增强并形成环状条纹, 经烧蚀斑结构调制的光束与未经调制的光束之间的峰值强度对比度和调制度都随传输距离的增加逐渐降低, 即调制效应随光束传输距离的增加而逐渐减小。

关键词 薄膜; 调制效应; 光强分布; 等离子体烧蚀; 激光预处理

中图分类号 O436.1; TB43 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0331003

Influence of Plasma Scalds on Laser-Beam Distortion for 1064 nm High-Reflectivity Laser Film Surface

Chen Weixiao^{1,2} Li Dawei¹ Liu Xiaofeng¹ Liu Wenwen^{1,2} Fang Zhou^{1,2} Zhang Lei¹

(¹ Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Plasma scalds will be induced in the 1064 nm high reflectivity thin film during laser preconditioning, and they will modulate the laser beam which irradiates the scalds area, leading to laser beam distortion. Energy distribution of 1064 nm continuous laser which irradiates the scalds area is tested, and the reason of modulation and its expression in different laser propagation distance is analysed, both of which provides basis for the functional damage evaluation and reasonable use of laser-conditioned sample. The result of the experiment indicates that the pit in the center of scalds may strengthen the peak intensity of beam with annular fringes, and the maximum energy contrast and modulation degree between un-modulated laser beam and modulated laser beam becomes smaller with the laser propagation distance increasing, which means the phenomenon of laser modulation caused by plasma scalds becomes weak with the increasing propagation distance.

Key words thin films; modulation effect; distribution of laser intensity; plasma scalds; laser preconditioning

OCIS codes 240.0310; 240.5770; 350.1820; 350.5340

1 引 言

激光预处理是提高光学薄膜元件激光损伤阈值的重要手段之一。所谓激光预处理是以略低于样品

损伤阈值的激光能量对样品进行辐照并逐渐提高辐照能量, 从而提高其抗激光能力^[1~6]。激光预处理是一种预损伤、良性损伤, 以较小的稳定的损伤来避

收稿日期: 2012-10-19; **收到修改稿日期**: 2012-11-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61107080)资助课题。

作者简介: 陈惟肖(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光薄膜损伤方面的研究。E-mail: chenweixiao@siom.ac.cn

导师简介: 李大伟(1978—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事光学薄膜损伤阈值测试及机理、激光预处理等方面的研究。E-mail: dawei_510@yahoo.com.cn(通信联系人)

免灾难性破坏。近年来光学薄膜元件的损伤判断标准逐渐由器质性向功能性转变,而功能性损伤以元件所在系统的整体性能表现为判断依据,从而使得激光预处理的应用有了实际意义^[7,8]。等离子体烧蚀是基频(波长为 1064 nm)激光预处理过程中的典型损伤形貌^[9~13],其在后续激光脉冲作用下比较稳定不易发展^[5,11],因此允许在一定数量、一定密度范围内存在。

光学显微镜下等离子体烧蚀表现为表面颜色变化,并且烧蚀区域内通常伴有微米量级的锥形坑。虽然等离子体烧蚀较其他损伤形貌有深度浅、面积大、对样品光性影响较小等特点^[9,12],但其存在依然会引起样品膜层结构的变化,对传输光束质量产生影响^[14,15,18,19]。本文通过实验研究了这种表面状态对入射光束传输特性的影响,考查了等离子体烧蚀产生后 1064 nm 高反(HR)膜传输光束调制随传输距离的变化,为判断经预处理元件是否产生功能性损伤/预处理后元件的合理使用、避免系统光路上下游元件的损伤提供了参考。

2 实验过程

2.1 样品制备

采用电子束蒸发制备 1064 nm 高反膜,直径为 50 mm,膜系S/L(HL)¹¹H4L/A,高低折射率材料分别

为 HfO_2 和 SiO_2 ,K9 基底。使用角度为 37.5° ,中心波长反射率达到 99.9%。在样品表面选取 20 mm×20 mm区域,通过 1064 nm 波长激光预处理形成等离子体烧蚀,即采用小光斑扫描的方式,以低于样品阈值的能量(n-step 的阈值能量递增方式^[18])对样品特定区域进行处理。图 1 和图 2 分别给出了烧蚀的整体形貌和烧蚀中心小尺寸锥形坑形貌的扫描电子显微镜图。烧蚀一般表现为以节瘤喷溅引起的锥形小坑为中心,外围分布带有杂色的波纹起伏结构,其形状为圆形或椭圆形(与激光入射角度有关)^[18,19],中心小坑的横向和纵向尺寸都是微米量级,外围杂色区域横向尺寸为百微米量级,纵向深度为百纳米量级,越靠近中心小坑深度越深。

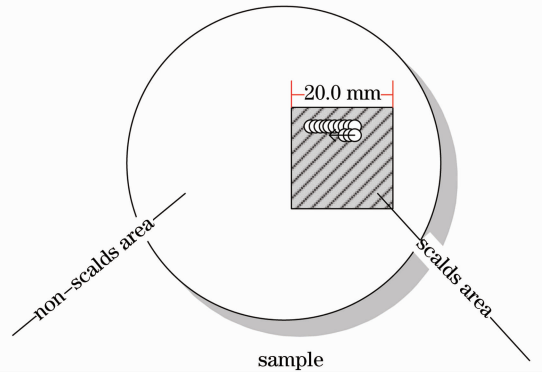


图 1 样品制备

Fig. 1 Preparation of sample

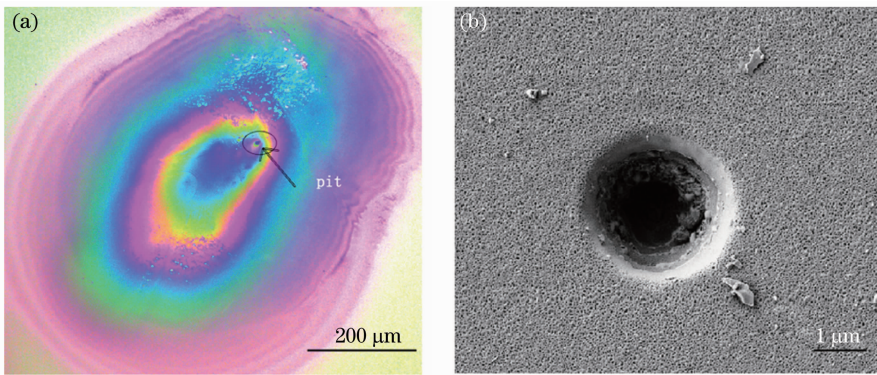


图 2 等离子体烧蚀形貌。(a)烧蚀整体形貌;(b)烧蚀中心微米量级锥形坑形貌

Fig. 2 Morphology of plasma scalds. (a) Whole morphology; (b) morphology of micrometer-order taper pit in the scald center

2.2 传输光束记录

观察光束畸变的实验装置如图 3 所示,采用波长为 1064 nm 的连续光作为传输光源,He-Ne 激光器光束作为光路指示光。经过一系列透镜扩束、准直并通过能量控制系统后照射在样品上;样品置于二维移动平台上,移动平台可使激光束辐照于不同位置;采用光束分析仪来记录、分析不同位置处反射

光束的能量分布。测量远场情况时需光路中加一透镜(焦距为 2.0 m)并将电子耦合器件(CCD)放置在透镜的焦点位置,如图 3 中的虚框所示,测试光斑直径为 3 mm 左右,实际使用中传输光束从数毫米到数十厘米不等,选取测试光斑尺寸在烧蚀尺寸的十倍左右,可以认为与实际情况类似,这对研究烧蚀区域整体对光束质量的影响很有意义。

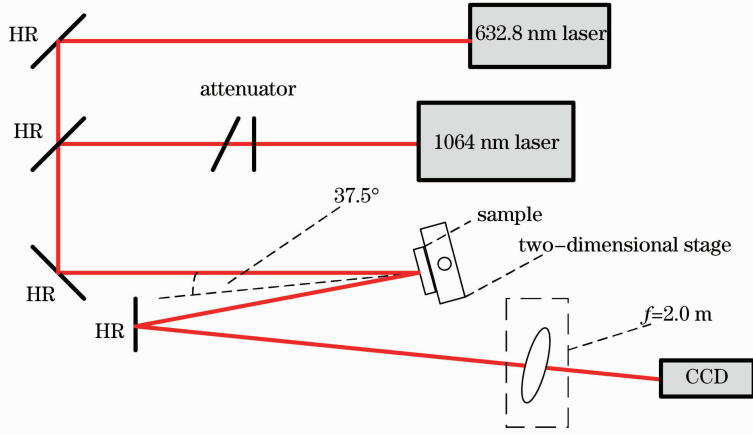


图3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

通过移动平台调整样品位置,使光束分别照射在样品表面未烧蚀区域和烧蚀区域,测量光束经过反射膜样品反射后在不同传输距离及远场的光强分布,为清晰描述光束的变化规律,分别在 13.0, 28.0, 31.0, 39.0, 47.0, 55.0, 63.0, 71.0, 101.0 cm 及远场(透镜焦点处)10 个位置处进行测量。

蚀区域光束分析仪采集的对比图片。由图 4 可以看出,由于样品表面等离子体烧蚀结构的存在,传输光束出现明显的强度调制,经样品反射后在近场区域光束中心区域强度远强于未调制光斑强度,周围出现强弱相间的环状条纹;随着传输距离增加,中心强度降低,条纹对比度逐渐减小,同时条纹向远离圆环中心的方向扩散,视场内条纹宽度逐渐增加、条纹数量减少,等离子体烧蚀对光束的调制作用减弱,传至无穷远处时光强分布已无明显差别。此外,观察传输距离为 71.0 cm 处的光强分布,虽然结构上类似,但经等离子体烧蚀调制的光斑整体强度已明显弱于

3 实验结果讨论

3.1 光强分布分析

图 4 为在实验测量的 10 个位置中选取的 4 个具有代表性位置处,光束经过样品非烧蚀区域与烧

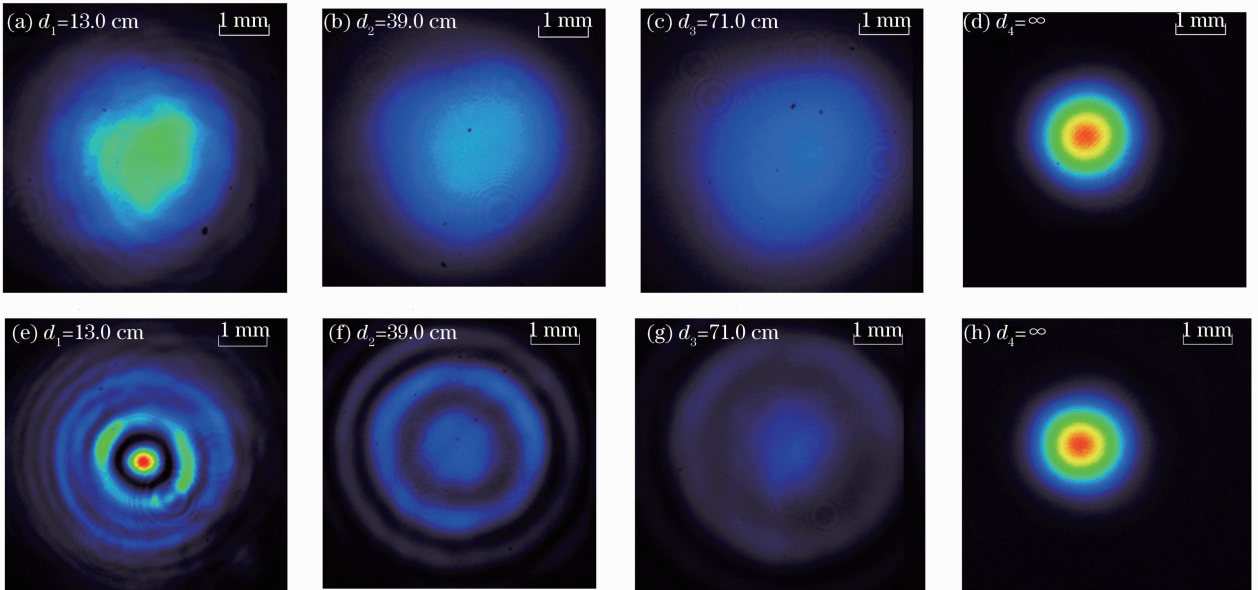


图 4 烧蚀结构对光束的调制随距离的变化。(a)~(d)光束经未烧蚀区域后在不同位置处的光斑形貌；
(e)~(h)光束经烧蚀区域后在不同位置处的光斑形貌

Fig. 4 Beam modulation by scald structure with different propagation distances. (a)~(d) Beam morphology at different positions after the beam irradiates non-scalds area; (e)~(h) beam morphology at different positions after the beam irradiates scalds area

未调制的,刘晓凤等^[18]的研究表明,烧蚀区域的粗糙度较之未烧蚀区域的粗糙度有所增加,可能会引起的样品表面散射增强,导致传输光束能量损失。

为了直观的表现出光强分布及其随传输距离的衍化,图 5 给出图 4 中光斑的数值化的强度分布(输出光斑的 X 截面数据)。其中黑色代表光束经过样品未烧蚀区域反射后光束能量分布,红色代表光束经过烧蚀区域后反射光束能量分布。显然调制光束

的最大强度随传输距离的增加逐渐减弱。如在样品表面后 13.0 cm 处最大光强近于原值的 2 倍,而在 28.0 cm 处仅为 1.2 倍,传输至 31.0 cm 时已经低于未调制光束。即烧蚀对光束最大强度的调制在一定的光束传输距离范围内表现为增强效果,随后表现为减弱的效果,但无论表现为哪种效果,调制作用都随光束传输距离的增加有所减小,远场情况下,调制作用趋于 0。

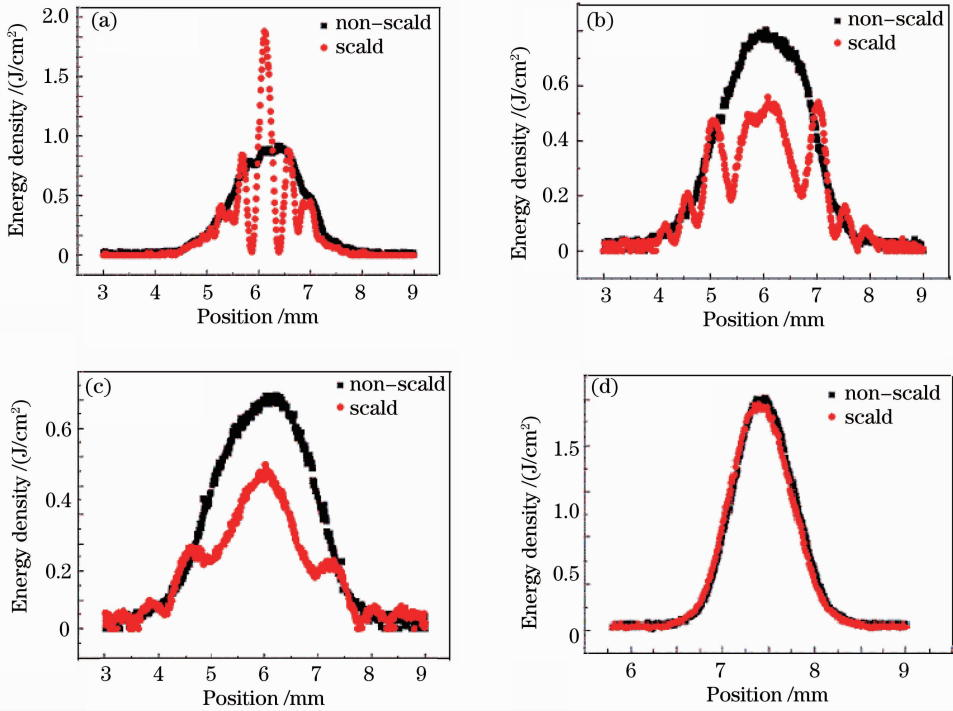


图 5 调制光斑数值化强度分布。(a) $d_1=13.0$ cm; (b) $d_2=39.0$ cm; (c) $d_3=71.0$ cm; (d) $d_4=\infty$
 Fig. 5 Numericalized intensity distribution of modulated beam. (a) $d_1=13.0$ cm; (b) $d_2=39.0$ cm; (c) $d_3=71.0$ cm; (d) $d_4=\infty$

图 6 给出了调制光束与未经调制光束峰值强度的对比度及其随传输距离的变化。三角线和星形线分别代表经烧蚀调制光束和未经调制光束在不同光束传输距离处的峰值能量曲线;矩形线为两者之间的对比度值随光束传输距离的变化,其中对比度值为每个测试位置处调制光束与未经调制光束峰值的比值。由图 6 可以看出,在 10 个实验测试位置中,13.0 cm 及 28.0 cm 处的对比度值是大于 1 的,即烧蚀对光束峰值强度的调制体现为增强效果,在随后的几个位置处的对比度值是小于 1 的,即调制体现为对峰值强度的减弱效果,但对比度值的整体变化规律是随着光束传输距离的增加逐渐趋于 1 的,图 6 中代表远场条件的对比度值为 0.96,已非常接近于 1,即烧蚀对光束的调制作用随距离的增加而逐渐减小的。

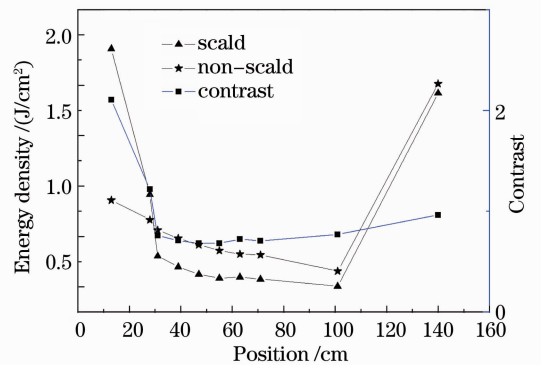


图 6 经调制和未经调制的光束最高强度对比度
 Fig. 6 Maximum intensity contrast between modulated and non-modulated beams

为研究烧蚀对光束能量分布的整体调制效果,图 7 给出了经过烧蚀调制的光束强度分布与未经过烧蚀的光束强度分布之间偏离度 D 值及其随传输

距离的变化规律, 偏离度的计算表示为

$$D = \frac{1}{W_{h/2}} \int_0^{W_{h/2}} \left| \frac{E_{\text{non-s}} - E_s}{E_{\text{non-s}}} \right| dx, \quad (1)$$

式中 $W_{h/2}$ 为光斑峰值能量 $1/e^2$ 之间的横坐标跨度; $E_{\text{non-s}}$ 和 E_s 分别为经烧蚀和未烧蚀区域光斑对应位置的能量。

由图 7 给出的光强分布偏离度随传输距离的变化可以看出, 传输距离在 30 cm 以内时 D 随传输距离增加迅速由 0.7 降至 0.4 左右, 之后逐渐减小并趋于平缓, D 值维持在 0.3~0.4 之间, 传输至远场时 D 已降低为 0.05。即经调制的光强整体分布与未经调制的分布之间的偏离程度随距离的变化分两个阶段, 第一阶段偏离度随光束传输距离的增加迅速减弱, 第二阶段随距离增加偏离度缓慢的降低, 远场即无穷远处, 偏离度趋于 0。

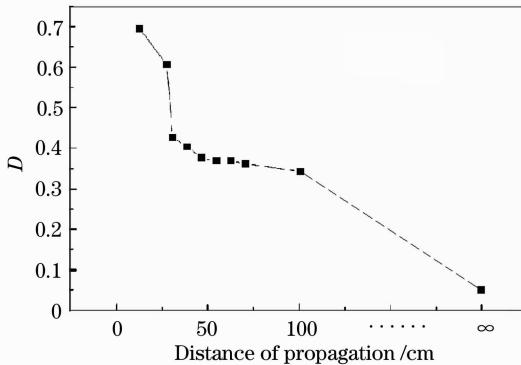


图 7 光强分布偏离度 D 随距离的变化

Fig. 7 Degree of deviation in intensity distribution versus distance

3.2 讨论

从上述实验结果可以看出, 传输光束经过有等离子体烧蚀的薄膜元件后会产生强度调制现象, 即传输光束光强分布的变化, 将此调制规律结合经激光预处理后的元件使用要求, 可帮助对元件功能性损伤进行判断。烧蚀结构将对光束波前的振幅与相位产生调制, 因此, 如果系统设计对传输光束相位有要求, 则要考虑前面讨论的调制规律将对光束的影响以判断预处理产生的烧蚀是否使样品发生了功能性损伤。另外, 光束经过有烧蚀的元件后的近场区域会出现强度增强, 有可能超过系统允许强度从而威胁光路下游元件的安全; 但增强效果随传输距离逐渐减弱。从实验结果看, 经样品后传输至约 30.0 cm 时即可与未调制光束相当。随着传输距离的增加, 烧蚀调制使光束产生的条纹将不断地向外扩散, 这也造成了光束能量的损失。因此, 在对光束

的能量传输效率有要求的光学系统中, 烧蚀对光束的调制规律也是判断预处理后元件是否产生功能性损伤的重要判断标准之一。

4 结 论

传输光束经过有等离子体烧蚀结构的薄膜样品后, 由于光束波前相位及振幅受等离子体烧蚀结构的影响, 光强分布产生调制, 烧蚀中心锥形坑及锥形坑外围大尺寸浅坑杂色结构引起的菲涅耳衍射是产生光束调制的主要原因。光强分布的调制主要表现为改变峰值强度、出现环状干涉条纹以及传输能量的损耗。经调制光束与未经调制光束的最大能量对比度及偏离度随传输距离的增加分别趋于 1 和 0, 即调制效应随传输距离的增加逐渐减弱, 远场处, 调制效应趋于 0。

参 考 文 献

- 1 M. R. Kozłowski, C. R. Wolfe, M. C. Staggs *et al.*. Large area laser conditioning of dielectric thin film mirrors [C]. *SPIE*, 1990, **1438**: 376~390
- 2 C. J. Stolz, L. M. Sheehan, M. K. von Gunten *et al.*. The advantage of evaporation of hafnium in a reactive environment to manufacture high damage threshold multilayer coatings by electron-beam deposition [C]. *SPIE*, 1999, **3738**: 318~324
- 3 C. R. Wolfe, M. R. Kozłowski, J. H. Campbell *et al.*. Laser conditioning of optical thin films [C]. *SPIE*, 1989, **1438**: 360~392
- 4 C. J. Stolz, L. M. Sheehan, S. M. Maricle *et al.*. A study of laser conditioning methods of hafnia silica multilayer mirrors [C]. *SPIE*, 1999, **3578**: 144~152
- 5 Yuanan Zhao, Tao Wang, Dongping Zhang *et al.*. Laser conditioning of $ZrO_2:Y_2O_3/SiO_2$ mirror coatings prepared by E-beam evaporation [J]. *Applied Surface Science*, 2005, **245**(1): 335~339
- 6 E. Eva, K. Mann, N. Kaiser *et al.*. Laser conditioning of LaF_3/MgF_2 dielectric coatings at 248 nm [J]. *App. Opt.*, 1996, **35**(28): 5613~5619
- 7 L. M. Sheehan, M. R. Kozłowski, C. J. Stolz *et al.*. Large-area damage testing of optics [C]. *SPIE*, 1996, **2775**: 357~369
- 8 J. Taniguchi, N. E. LeBarron, J. Howe *et al.*. Functional damage thresholds of hafnia/silica coating designs for the NIF laser [C]. *SPIE*, 2001, **4347**: 109~117
- 9 Xiaofeng Liu, Dawei Li, Yuanan Zhao *et al.*. Damage characteristics of HfO_2/SiO_2 high reflector at 45° incidence in 1-on-1 and N-on-1 tests [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(1): 41~44
- 10 S. C. Weakley, C. J. Stolz, Z. L. Wu *et al.*. Role of starting material composition in interfacial damage morphology of hafnia silica multilayer coatings [C]. *SPIE*, 1998, **3578**: 137~143
- 11 C. J. Stolz, J. A. Menapace, F. Y. Genin *et al.*. Influence of BK7 substrate solarization on the performance of hafnia and silica multilayer mirrors [C]. *SPIE*, 2003, **4932**: 38~47
- 12 Xiaofeng Liu, Yuanan Zhao, Dawei Li *et al.*. Characteristics of plasma scalds in multilayer dielectric films [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(21): 4226~4231
- 13 Xiaofeng Liu, Dawei Li, Yuanan Zhao *et al.*. Automated damage

- diagnostic system for laser damage threshold tests [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(4): 407~410
- 14 J. R. Schmidt, M. J. Runkel, K. E. Martin *et al.*. Scattering-induced downstream beam modulation by plasma scalded mirrors [C]. *SPIE*, 2007, **6720**: 67201H
- 15 F. Y. Genin, C. J. Stolz, M. R. Kozlowski. Growth of laser-induced damage during repetitive illumination of Hf₂-SiO₂ multilayer mirror and polarizer coatings [C]. *SPIE*, 1996, **2870**: 439~448
- 16 Su Qianqian, Zhang Guowen, Tao Hua *et al.*. Properties of the intensity distribution and the angular spectrum of a Gaussian beam with local phase modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1002005
苏倩倩, 张国文, 陶 华 等. 高斯光束经局域相位调制后的光强分布和角谱特性[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1002005
- 17 Zhao Junpu, Hu Dongxia, Dai Wanjun *et al.*. Wavefront characters of high power solid-state lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 152~156
赵军普, 胡东霞, 代万俊 等. 高功率固体激光系统光束波前畸变特性分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(s1): 152~156
- 18 Liu Xiaofeng. Integration Control of the Small-Beam Raster-Scan Laser Conditioning System and Process Optimization [D]. Shanghai: Key Laboratory of High Power Laser Materials, 2011. 5~8
刘晓凤. 小光斑扫描激光预处理系统集成控制与工艺优化[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2011. 5~8
- 19 Liu Xiaofeng, Li Dawei, Li Xiao *et al.*. 1064 nm laser conditioning effect of HfO₂/SiO₂ high reflectors deposited by E-beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1545~1549
刘晓凤, 李大伟, 李 笑 等. 电子束蒸发制备 HfO₂/SiO₂ 高反膜的 1064 nm 激光预处理效应[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1545~1549

栏目编辑: 韩 峰