

文章编号: 0258-7025(2007)05-0723-05

# 利用 CO<sub>2</sub> 激光预处理提高熔石英基片的损伤阈值的损伤阈值

黄 进, 吕海兵, 叶 琳, 赵松楠, 王海军, 蒋晓东, 袁晓东, 郑万国

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 为了提高熔石英基片对 351 nm 短波长激光的损伤阈值, 采用光栅式扫描方式, 利用 CO<sub>2</sub> 激光器输出 10.6 μm 波长的激光, 对氢氟酸蚀刻后的小口径熔石英基片表面进行功率周期递增的辐照扫描。结果表明, 经过 CO<sub>2</sub> 激光预处理后的熔石英基片, 表面微观形貌得到了有效改善; 利用 S: 1 的方法测量熔石英基片损伤阈值。结果发现, 在中度激光抛光的程度下, 其零概率损伤阈值提高了 30% 左右, 且对透射波前没有造成不利影响, 从而证明了 CO<sub>2</sub> 激光预处理提高熔石英基片抗激光损伤能力的有效性。

**关键词** 激光技术; 预处理; 光栅式扫描; CO<sub>2</sub> 激光; 熔石英基片; 损伤阈值

**中图分类号** TN 249 **文献标识码** A

## Damage Threshold Improvement of Fused Silica Chip by CO<sub>2</sub> Laser Pretreatment

HUANG Jin, LÜ Hai-bing, YE Lin, ZHAO Song-nan,

WANG Hai-jun, JIANG Xiao-dong, YUAN Xiao-dong, ZHENG Wan-guo

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** In order to improve the damage threshold of fused silica chip, the bare fused silica chip with small aperture etched by hydrofluoric acid is scanned by 10.6 μm CO<sub>2</sub> laser with a raster scanning form, and the laser power increases periodically. Results show the surface micro-topography of the pretreated chip is greatly improved. The means of S: 1 method is used to measure its damage threshold. Under the conditions of moderate laser polishing, the zero probability damage threshold of the fused silica chip is increased by 30%, and no negative effect on transmission wavefront is introduced. The validity of CO<sub>2</sub> laser pretreatment enhancing the bare fused silica chip damage resistant is proved.

**Key words** laser technique; pretreatment; raster scanning; CO<sub>2</sub> laser; fused silica chip; damage threshold

## 1 引 言

目前大型高功率固体激光装置的建造和运行中, 光学元件在 351 nm 短波长激光下的负载能力已经成为影响装置输出通量的最大瓶颈, 因此如何提高短波长下光学元件的负载能力已成为抗损伤研究的主要课题。目前提高熔石英基片损伤阈值可从两方面着手: 1) 提高熔石英基片的机械抛光质量, 减少抗损伤的薄弱区域; 2) 通过激光对基片进行预辐照来提高损伤阈值。可用于对熔石英基片进行预处

理的激光通常有两种, 即波长分别为 351 nm 的紫外脉冲激光和 10.6 μm 的 CO<sub>2</sub> 连续激光。国外在 1979 年就开展了利用 CO<sub>2</sub> 激光对熔石英基片进行预处理以增强其在短波长激光下损伤阈值的研究, 美国的利弗莫尔国家实验室为此专门建立了激光预处理实验室, 现在不管从理论模型还是工艺上都已经取得了一系列成果。据相关文献报道, 在经过了 CO<sub>2</sub> 激光预处理后, 熔石英基片在 351 nm 波长激光下的损伤阈值可提高 1.5~2 倍<sup>[1,2]</sup>, 国内对于利用 CO<sub>2</sub> 激光对熔石英基片进行预处理的研究还处于

收稿日期: 2006-09-12; 收到修改稿日期: 2006-11-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划专项经费(2006AA8048040)资助课题。

作者简介: 黄 进(1980—), 男, 四川绵阳人, 研究实习员, 主要从事高功率固体激光技术研究。E-mail: huangj-88@tom.com

起步阶段,但随着神光Ⅲ原形装置的建造,其研究及应用意义非常重大。本文利用扫描功率周期递增的方法对熔石英基片进行了全口径的 CO<sub>2</sub> 激光辐照预处理,并采用原子力显微镜及干涉仪等设备分析对比预处理前后熔石英基片的表面质量变化,获得了较为理想的实验结果。

## 2 CO<sub>2</sub> 激光预处理工作原理

采用普通机械抛光工艺对熔石英基片表面进行抛光后会在表面和亚表面留下可见或隐藏的划痕、裂缝等缺陷,这些缺陷会在实际使用过程中成为强激光能量的超强吸收点,从而容易引发基片的损伤<sup>[3]</sup>。当 CO<sub>2</sub> 激光作用于基片表面时,由红外辐射吸收产生的高温导致表面材料熔融减小了熔石英材料黏度,使材料表面产生张力填补表面裂纹和缺陷点,从而可有效改善熔石英基片表面的微观结构并增强其光学强度,最终提高熔石英基片材料的抗激光损伤能力<sup>[4]</sup>,图 1 显示了易导致熔石英基片发生损伤的表面缺陷。

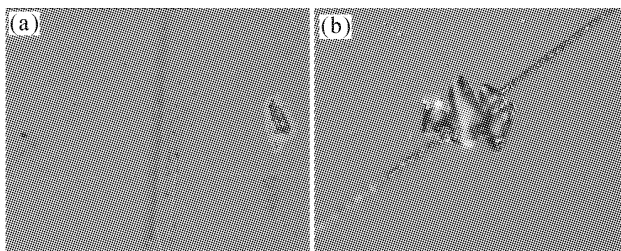


图 1 显微镜观察到的基片划痕(a)和由其导致的损伤(b)

Fig. 1 Crack (a) and crack induced damage (b) on fused silica by microscope

## 3 CO<sub>2</sub> 激光预处理流程

### 3.1 预处理装置概述

激光预处理研究所采用的激光器是功率为 120 W 的 CO<sub>2</sub> 激光器,功率线性可调,光斑直径为

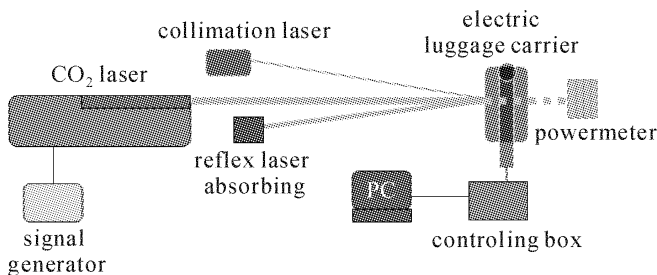


图 2 激光预处理光路示意图

Fig. 2 Experimental arrangement for laser pretreatment

4 mm,近场高斯型分布。预处理光路示意图如图 2 所示。

熔石英基片载物台为 PC 程控的电动 2D 平移台,步进精度 10 μm。预处理过程中由信号发生器给出激光器的触发信号以控制激光输出,与此同时计算机控制电动平移台载动待处理的熔石英基片按照预先设定的平移路径移动,从而使得整个基片表面都能够接受激光处理。

### 3.2 预处理关键控制参数

预处理的作用对象是基片表面和亚表面的缺陷,因此在对其进行预处理之前通过氢氟酸蚀刻对基片表面隐藏的缺陷进行充分的暴露,从而让激光预处理能够充分作用到所有的缺陷。由于这种预处理方式是通过激光作用在熔石英基片表面时的高温熔融作用来修复缺陷,熔融的程度将直接影响到预处理后基片的损伤阈值和透射波前质量,因此,与熔融程度直接相关的上限激光扫描功率是整个处理过程中最为关键的参数。

#### 3.2.1 扫描路径

目前预处理所用 CO<sub>2</sub> 激光器的输出光斑近场分布如图 3 所示。

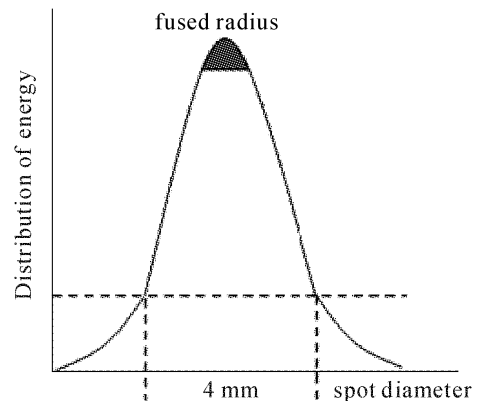


图 3 CO<sub>2</sub> 激光光斑近场分布

Fig. 3 Energy distribution for CO<sub>2</sub> laser spot

从图 3 可见,虽然扫描光斑的直径为 4 mm,但由于其高斯型近场的分布,在一定功率下作用于基片表面时真正能够发挥熔融作用的区域远远小于光斑口径,因此,在确定扫描路径时,一定要充分考虑扫描光斑能够对基片表面起到熔融作用的区域大小,尽量做到让基片表面发生均匀的微熔变化,以增强处理的均匀性。目前所采用的扫描方式为光栅刻线式,具体扫描路径如图 4 所示。

扫描行间距由激光辐照时对表面的熔融区域大小来定,经研究证明,在 95 W 的上限扫描功率和 10 mm/s 的扫描速度作用下,激光在基片表面留下

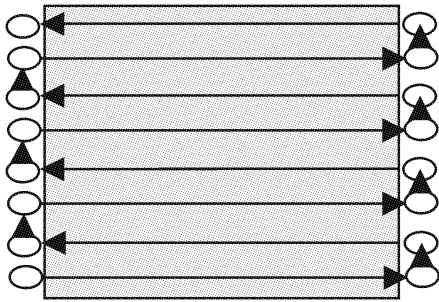


图 4 光栅刻线式扫描路径示意图

Fig. 4 Sketch map of raster scanning

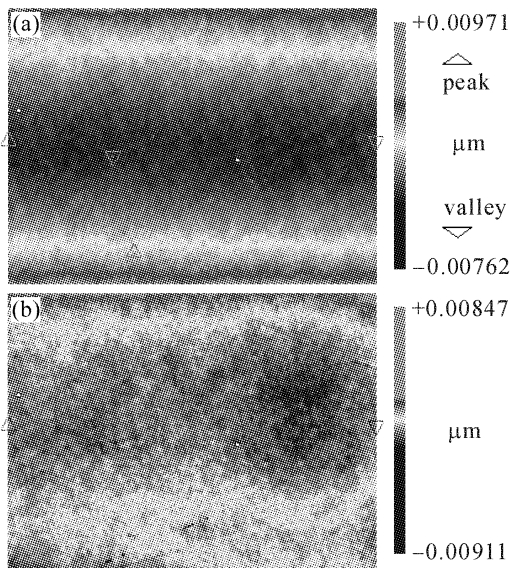


图 5 0.5 mm(a)和 0.25 mm(b)扫描间距带来的粗糙度变化

Fig. 5 Surface roughness change induced by means of 0.5 mm (a) and 0.25 mm (b) scanning space

的熔融斑直径为0.25 mm左右,因此将行间距设定为0.25 mm左右将有利于提高扫描均匀性;若将行间距设定过宽,将会直接导致预处理后基片表面行与行间隔区域的熔变不均。图 5 为采用轮廓仪测量到的扫描行间距分别为0.5 mm和0.25 mm时造成的基片不同的表面粗糙度形貌。

由此可见,采用接近光斑熔融区域大小的扫描行间距对基片表面带来的负面影响更小,预处理前表面粗糙度均方根(RMS)值约为0.45 nm,处理后

变成0.8 nm左右,而扩大扫描间距使得表面粗糙度大大增加,均方根值达到了2.2 nm左右,这会对处理后熔石英基片的透射波前造成不利影响。

### 3.2.2 扫描速度和功率

CO<sub>2</sub> 激光预处理过程中的扫描功率和速度将直接影响到基片表面缺陷被激光作用时发生熔变的程度。预处理的这种激光抛光程度可分为“轻度抛光”、“中度抛光”和“重度抛光”。只有将基片处理到轻度抛光程度以上,基片表面微观形貌才发生确切的不可恢复的熔融变化。研究发现,在采用10 mm/s的快速扫描时,达到轻度抛光程度所需的上限功率为75 W;将扫描速度降低一倍采用5 mm/s的慢速扫描时,达到轻度抛光所需上限功率并未因此降低一倍,而是55 W,由此可见,影响激光对基片表面造成熔融作用效果的关键是扫描功率的大小,扫描速度的影响相对较小,采用快速扫描并略微提高上限功率可在不影响预处理效果的前提下提高工作效率。

对功率控制来说,由于扫描过程会带来基片表面温度的骤变,为了减缓基片在处理过程中温度的剧烈变化,激光扫描时的功率必须要随着扫描周期次数的变化而逐渐递增,直至达到所需的表面抛光程度。扫描的上限功率越高,抛光程度越深,CO<sub>2</sub> 激光对基片表面缺陷的熔融修复作用就越明显,因此在重度抛光时基片的损伤阈值会获得最大的提高,但由于此时基片熔融程度较深,容易对基片透射波前造成不利影响,并且产生较大的热应力<sup>[5]</sup>。

## 4 实验结果

### 4.1 预处理对基片表面形貌及损伤阈值的影响

预处理结束后利用 S:1 的损伤阈值测量方法测量出样品的零概率损伤阈值,以此来判断预处理对熔石英基片的抗损伤增强效果<sup>[6]</sup>,如表 1 所示。

从表 1 可以看出,CO<sub>2</sub> 激光预处理的上限扫描功率越高(激光抛光程度越深),损伤阈值的提高幅

表 1 不同激光抛光程度对熔石英基片损伤阈值的影响

Table 1 Influence of different laser polishing degree on damage threshold of fused silica chip

Number	Surface quality before pretreatment ( $R_q$ )	Degree of laser polishing	Amplitude of zero probability damage-thresholds
1-12 <sup>#</sup>	0.352 nm	No fused light at treatment (about 60 W)	None
1-10 <sup>#</sup> -3	0.340 nm	Light-grade laser polishing (about 75 W)	5%
1-6 <sup>#</sup> -1	0.610 nm	Middle-grade laser polishing (about 90 W)	27%
1-6 <sup>#</sup> -3		Heavy-grade laser polishing (about 110 W)	52%

度越大。在轻度抛光程度下熔石英基片的零概率损伤阈值基本没有明显变化,中度抛光后损伤阈值增幅为 27%,在重度抛光处理后,零概率损伤阈值提高了 52%。

图 6 为处理前后的区域表面缺陷修复。从图 6 (b)可明显看到,处理后的熔石英基片表面,缺陷点被明显修复变浅变淡,这正是被 CO<sub>2</sub> 激光熔融后的表现。图 7 则反映了预处理后用原子力显微镜观察到的熔石英基片的微观表面缺陷(划痕)所发生的变化。

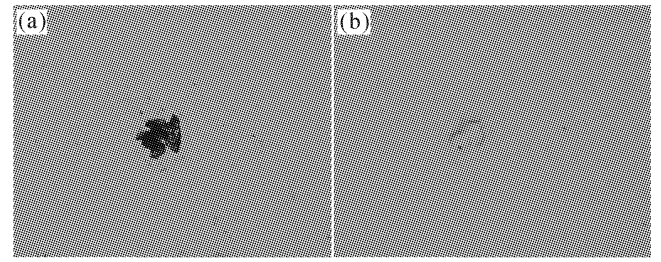


图 6 处理前(a)后(b)的区域表面缺陷修复  
Fig. 6 Surface defect repair before (a) and after (b) pretreatment

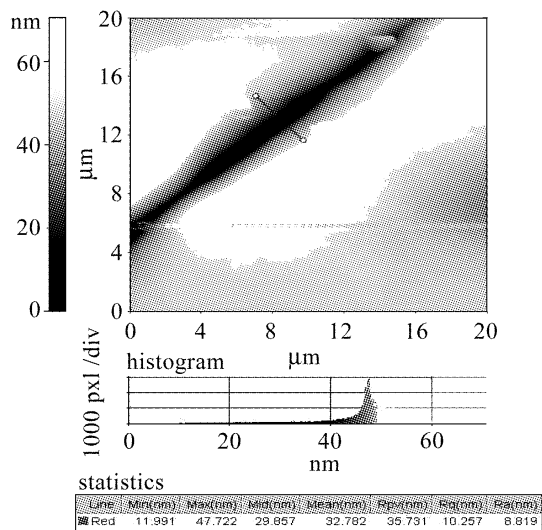
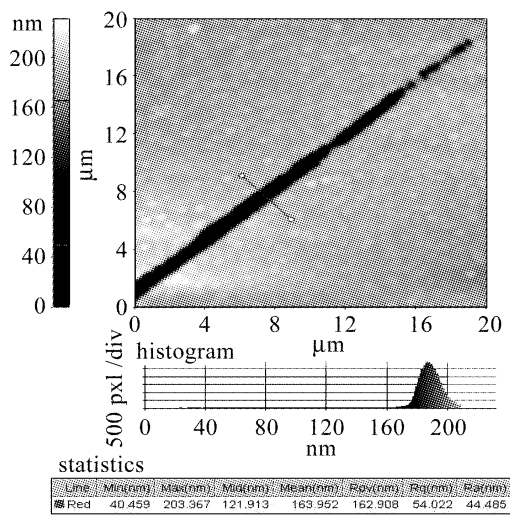
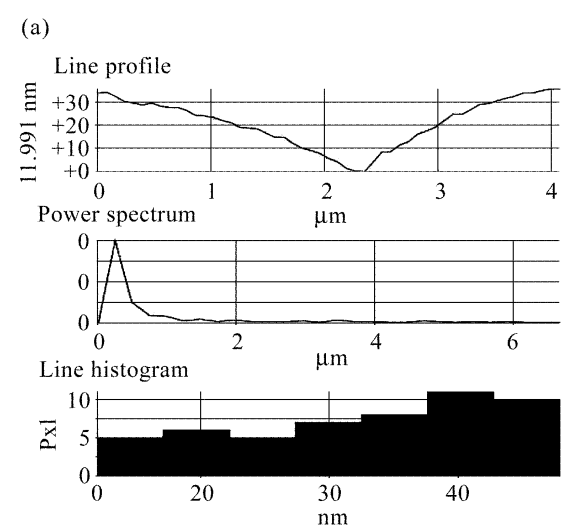
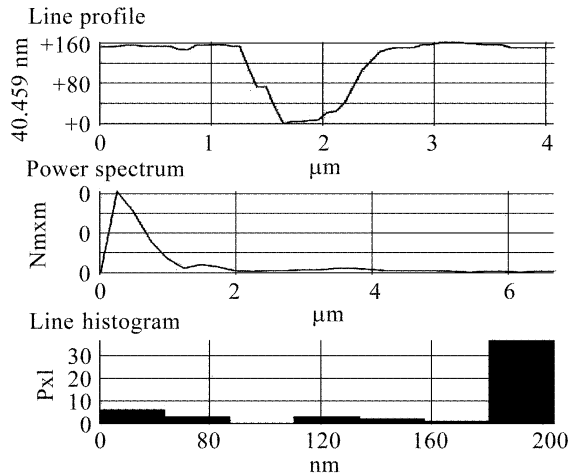


图 7 原子力显微镜观测到的预处理前(a)后(b)基片表面形貌变化

Fig. 7 Surface topography change of bare fused silica chip before (a) and after (b) pretreatment by atomic force microscope

从图 7 可见,采用 CO<sub>2</sub> 激光对熔石英基片进行预处理,能够大大改善基片的微观表面质量,预处理前后划痕区域表面峰谷起伏偏差(Rpv 值)和表面粗糙度均方根(Rq 值)分别由 162 nm, 54 nm 变化到 36 nm, 10 nm, 划痕的变浅使得基片微观表面粗糙度在处理后的明显减小,由此带来损伤阈值的明显提



(b)

高。

#### 4.2 预处理对透射波前的影响

由于 CO<sub>2</sub> 激光预处理所带来的损伤阈值提高效果是以基片表面的熔融微变为代价换来的,所以经过预处理后的基片表面透射波前是否发生变化将直接影响到其实际的工程应用。图 8 是经过中度抛

光预处理后的一块熔石英基片预处理前后的透射波前整体分布图对比。

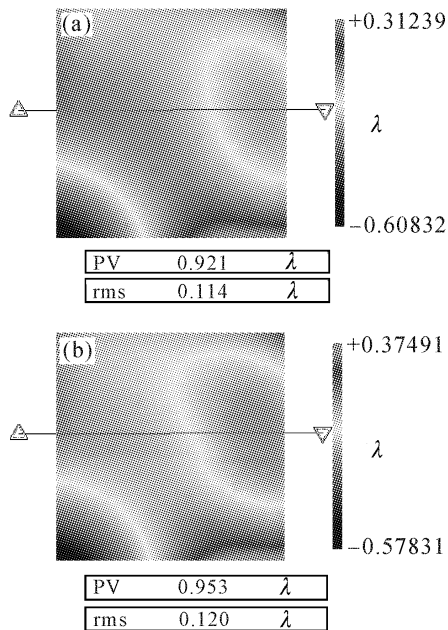


图 8 预处理前(a)后(b)对透射波前的影响

Fig. 8 Effect of before (a) and after (b) pretreatment on transmission wavefront

图 9),这是由于在预处理过程中,基片表面被激光扫描过的地方表面发生微熔形变造成的,条纹的分布正好与扫描路径一致。

如图 9 结果显示,由扫描条纹带来的波前畸变仅为  $0.015\lambda$ ,因此扫描条纹对整个面型的影响完全可以忽略不计。综合看来,预处理对面型精度的影响可以忽略。

## 5 结 论

从目前的结果来看,采用中度激光抛光(约 90 W)及 10 mm/s 的扫描速度对熔石英基片进行预处理可有效改善其微观表面质量,从而提高对 351 nm 短波长激光的抗损伤能力,并不会对基片的面形精度造成负面影响。当然,目前 CO<sub>2</sub> 激光预处理还会对基片带来一些负面影响(如应力的产生),损伤阈值的提高效果还有待进一步提高,探索新的扫描方式和基片热退火工艺将会有望解决目前存在的问题。

## 参 考 文 献

- 1 Raymond M. Brusasco, Bernie M. Penetrante, John E. Peterson *et al.*. CO<sub>2</sub>-Laser Polishing for Reduction of 351-nm Surface Damage Initiation in Fused Silica [M]. Laser Induced Damage in Optical Material, 2001. 1~2
- 2 R. M Brusasco, B. M. Penetrante, J. A. Butler *et al.*. Localized CO<sub>2</sub> Laser Treatment for Mitigation of  $3\omega$  Damage Growth on Fused Silica [C]. Boulder Damage Symposium on Optical Material, 2001. 1~3
- 3 Chen Fei, Meng Shaoxian. Damage mechanism of optical material [J]. *Progress in Physics*, 1998, **18**(2):198~206  
陈 飞,孟绍贤. 光学材料破坏机理[J]. *物理学进展*, 1998, **18**(2):198~206
- 4 M. D. Feit, A. M. Rubenchik, C. D. Boley *et al.*. Development of a Progress Model for CO<sub>2</sub> Laser Mitigation of Damage Growth in Fused Silica [C]. Annual Symposium on Optical Material for High Power Laser, 2002. 16~18
- 5 M. D. Feit, A. M. Rubenchik, C. D. Boley *et al.*. Development of a Prosess Molde for CO<sub>2</sub> Laser Mitigation of Damage Growth in Fused Silica [C]. Annual Symposium on Optical Material for High Power Laser, 2003. 22~24
- 6 Yang Jinxin, Zhuang Yifei, Gao Qi *et al.*. Platform for laser induced damage threshold test of optical elements [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **31**(Suppl.):430~433  
杨镜新,庄亦飞,高 奇等. 光学元件的激光损伤阈值测试平台[J]. *中国激光*, 2003, **31**(增刊):430~433

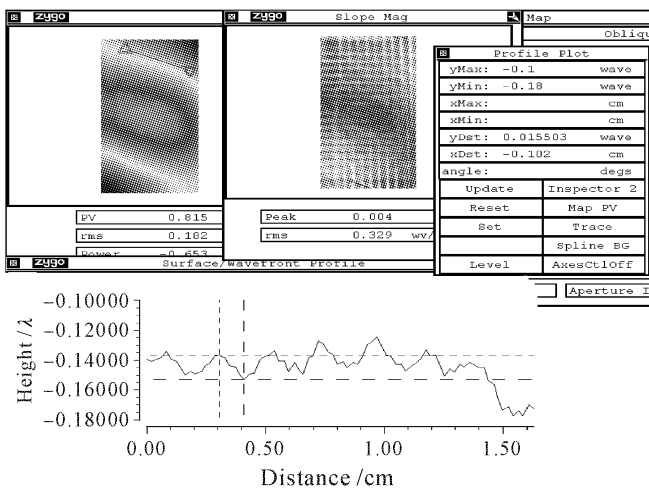


图 9 扫描条纹导致的波前畸变

Fig. 9 Wavefront aberration induced by scanning stria

经过预处理后的熔石英基片,表面峰谷起伏偏差(PV)值由  $0.921\lambda$  变为  $0.953\lambda$ ,均方根值由  $0.114\lambda$  变化为  $0.120\lambda$ ,整体透射波前参数没有发生明显变化。不同之处在于经过预处理后的基片面形分布图局部放大后能见到不太明显的微弱条纹(见