

## 光学薄膜损伤表面三维微观形貌的仿真与重构

张昭琳, 苏俊宏\*

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 通过对激光作用薄膜元件后的损伤过程和图像损伤特征进行分析与研究, 借助光学薄膜损伤表面三维微观形貌的重构, 揭示薄膜元件损伤机理。基于白光干涉显微原理, 采集薄膜损伤表面的干涉显微三维云数据, 运用 Delaunay 三角剖分法构建损伤表面的三角网格模型, 通过可视化仿真, 实现了损伤表面三维微观形貌的再现。结果表明: 实验测试的  $\text{HfO}_2$  薄膜表面损伤区域呈坑状凹陷, 损伤形貌不规则, 内部有鼓包、裂纹存在, 边缘处陡度变化大、毛刺较多; 对重构图像、VEECO Vision 软件处理结果、Taylor-Hobson 非接触式轮廓仪测试结果进行对比后发现, 重构图像能更直观、全方位地再现损伤表面细微形貌。研究结果给分析损伤表面形貌特征、调控高损伤阈值薄膜制备工艺提供了技术支持。

**关键词** 测量; 薄膜元件; 白光干涉; 三维微观形貌; Delaunay 三角剖分; 重构

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0212002

## Simulation and Reconstruction of 3D Microscopic Morphology of Damaged Optical Film Surface

Zhang Zhaolin, Su Junhong\*

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

**Abstract** In this study, the damage mechanism of thin film components is revealed by reconstructing the three-dimensional (3D) micro-morphology of a damaged optical film surface and by analyzing and studying the damage process and image damage characteristics of thin film components after laser irradiation. The interference microscopic 3D cloud data of the damaged thin film surface is collected based on the principle of white light interference microscopy. The triangular mesh model of the damaged surface is constructed using the Delaunay triangulation method. Moreover, the 3D micro-topography of the damaged surface is reproduced through a visual simulation. The results show that the surface damage areas of  $\text{HfO}_2$  films tested in the experiments are pit-shaped. The damage morphology is irregular (i. e., many bulges and cracks exist inside). In addition, the edge steepness greatly changes, and more burrs are observed. Compared with the reconstructed image, processing results of the VEECO Vision software, and test results of the Taylor-Hobson non-contact profiler, the reconstructed image can more intuitively and comprehensively reproduce the micro-morphology of a damaged surface. The results provide technical support for analyzing the morphology of the damaged surface and controlling the preparation process of films with high-damage threshold.

**Key words** measurement; film element; white light interference; three-dimensional micro-morphology; Delaunay triangulation; reconstruction

**OCIS codes** 120.6650; 240.0310; 180.3170; 100.3010

## 1 引言

高能激光系统中, 光学薄膜是一种重要但易损

伤的元件, 在激光作用下会发生断裂、脱落、热熔融及气化等破坏性损伤<sup>[1]</sup>。随着激光系统输出功率的不断提升, 光学薄膜的激光诱导损伤阈值(LIDT)逐

收稿日期: 2020-07-02; 修回日期: 2020-08-13; 录用日期: 2020-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(61378050)、陕西省国际科技合作重点项目(2018KWZ-02)

\* E-mail: sujhong@126.com

渐成为限制激光系统输出功率提升的关键因素,并对系统稳定运行产生重大影响<sup>[2]</sup>。因此,研究出一种可行、定量、通用性强的非破坏性元器件表面损伤检测方法是当下十分紧迫的研究工作。再现光学薄膜损伤区域的三维微观形貌,有助于分析薄膜损伤的原因和机理,制备出 LIDT 高、使用寿命长且满足高能激光系统需求的薄膜,在促进高功率激光系统的发展上具有重大意义<sup>[3]</sup>。目前三维点云数据的获取主要依靠三维激光扫描仪,其测量速度快,但通常结构复杂、体积大且测量精度最高仅达毫米级<sup>[4]</sup>,不适合用于精密测量领域。与此同时,三维微观形貌测试仪器众多,如激光扫描共聚焦显微镜<sup>[5-7]</sup>、原子力显微镜<sup>[8]</sup>、干涉显微镜<sup>[9-10]</sup>及透射电子显微镜<sup>[11]</sup>等,但在实际工程应用中,由于微小物体尺寸和结构的特殊,需要结合待测表面形貌特点、测量精度和效率等方面的要求再选择合适的测量手段。激光作用下损伤的光学薄膜中损伤区域形貌多变,常规形貌测量仪器受分辨率和测量原理影响,在损伤区域相邻高度陡度变化大的地方会丢失部分细节信息,不能完整地再现损伤区域的细微全貌,严重影响后续研究工作。因此重构光学薄膜损伤表面三维微观形貌、丰富精密元器件表面三维形貌的测量途径具有重要的现实意义。

本文基于微表面三维形貌测量和点云三维重构的理论知识,结合实际损伤表面形貌特点,利用干涉显微镜获取损伤表面的三维点云数据,使用 Delau-

nay 三角剖分、逐点插入的循环思想建立损伤表面的三角网格模型。在 Visual Studio 2010 开发环境下,配置可视化工具包(VTK),利用 C++ 编程对获取的三维采样数据进行处理,重构光学薄膜损伤表面的三维微观形貌,利用相关形貌测量仪器对重构效果进行评价。

## 2 损伤数字图像的全场获取与损伤表面模型的建立

### 2.1 损伤数字图像的全场获取

以激光作用下的单层氧化钬( $\text{HfO}_2$ )薄膜为研究对象,采用电子束热蒸发法对薄膜进行镀制,真空度为  $1.5 \times 10^{-2}$  Pa,沉积速率为 0.35 nm/s,烘烤温度为 180 °C,最终所得膜层厚度约为 274 nm。激光作用过程在自主研发的激光损伤阈值测试仪上进行,以 S-on-1 辐照方式,用波长为 1064 nm、脉宽为 10 ns、脉冲能量为 30 mJ、横截面能量呈高斯分布的 Nd:YAG 激光器对样品表面中心连续辐照 15 次,样品所处位置的光斑直径为 0.8 mm。利用 VEECO 干涉显微镜对激光作用后的薄膜表面进行三维数据的采样,仪器主机采用共光路的 Mirau 型显微干涉物镜<sup>[12]</sup>,结构如图 1 所示。该仪器测量模式包括以单色光为光源的相移干涉(PSD)模式<sup>[13]</sup>和以白光为光源的垂直扫描干涉(VSI)模式。

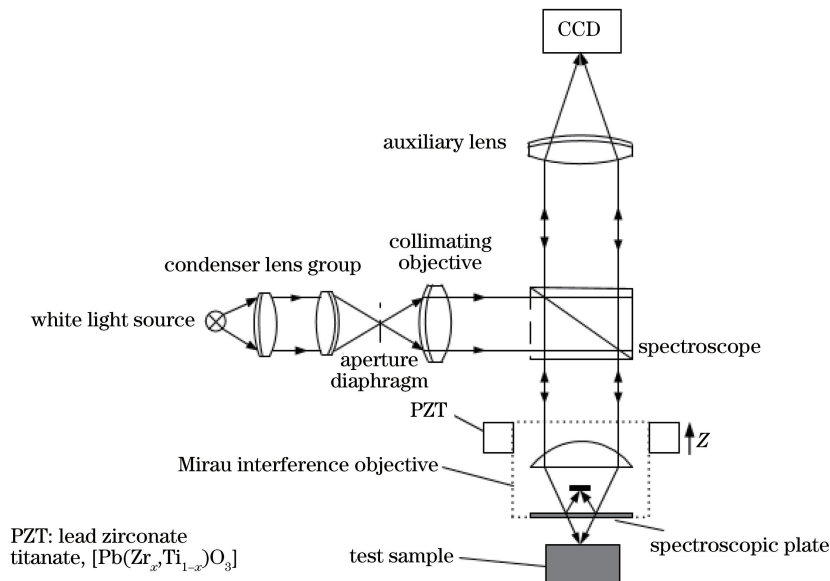


图 1 Mirau 型干涉显微镜原理图

Fig. 1 Schematic of Mirau-type interference microscope principle

由双光束干涉理论,可得平稳光场的普遍干涉定律:

$$I(z) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \text{Re}[R(\tau_d)], \quad (1)$$

式中: $I(z)$ 为坐标位置  $z$  处的光强值; $I_1$  和  $I_2$  分别

为参考光强和测量光强;  $\text{Re}[R(\tau_d)]$  为复相干度的实部;  $\tau_d$  为时间延迟。根据白光干涉条纹分布特点, 光源光谱分布可用 Gaussian 函数表示:

$$S(\nu) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\Delta\nu} \exp\left[-\left(\frac{\nu - \nu_0}{2\Delta\nu}\right)^2\right], \quad (2)$$

式中:  $\Delta\nu$  为光谱的半峰全宽(有效宽度);  $\nu$  为频率, 以光谱中心频率  $\nu_0$  为对称轴。对  $S(\nu)$  进行傅里叶变换处理后, 可得

$$R(\tau_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\nu) \exp(j2\pi\tau_d\nu) d\nu. \quad (3)$$

对(3)式进行换元处理后, 可得

$$R(\tau_d) = \exp(-j2\pi\nu_0\tau_d) \exp(-4\pi^2\Delta\nu^2\tau_d^2). \quad (4)$$

将(4)式代入(1)式, 得归一化的干涉方程为

$$I(z) = I_1 + I_2 +$$

$$2\sqrt{I_1 I_2} \exp(-j2\pi\nu_0\tau_d) \exp(-4\pi^2\Delta\nu^2\tau_d^2). \quad (5)$$

设背景光强  $I_0 = I_1 + I_2$ , 条纹对比度  $\gamma = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}$ , 同时根据白光干涉信号的高斯包络公式  $g(z - h_0) = \exp\{-[(z - h_0)/(2\pi/L_c)]^2\}$ , 其中  $h_0$  表示实际测试表面的高度值;  $L_c$  表示光源的相干长度<sup>[14]</sup>, 则白光干涉信号表达式为

$$I(z) = I_0 \left\{ 1 + g(z - h) \gamma \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda_0}(z - h)\right] \right\}, \quad (6)$$

式中:  $h$  为测量表面的高度值;  $\lambda_0$  为白光光源的中心波长。由(6)式可知,  $I(z)$  是一个由高斯函数包

络的余弦函数。结合白光相干长度短、只有在零光程差位置处( $z = h$ ) 光强和对比度才会达到最大值的特点, 说明白光干涉不会出现单色光干涉时发生相位模糊的现象。由于激光损伤的随机性, 损伤区域存在深坑、鼓包、裂痕等复杂形貌, 即存在待测表面相邻两点间高度差大于  $1/4$  光源工作波长( $\lambda$ ) 的陡变情况, 因此选择不受相位模糊影响的 VSI 模式进行测量。VSI 法通过微调压电陶瓷(PZT), 扫描被测表面得到一系列干涉图像, 然后利用白光干涉处理算法提取被测表面各点的垂向零光程差位置, 进而还原被测表面的三维形貌<sup>[15]</sup>。同时, 利用仪器附带的 Vision 软件可以提取含有损伤区域三维坐标信息的点云数据。

## 2.2 点云数据的预处理

由于获取的原始点云数据量较大, 包含的冗余点会影响后续处理速度, 并且由于测量过程中仪器和外界环境产生的影响, 不可避免地会引入噪声。因此建模前, 需要对原始数据进行预处理, 降低噪声对模型质量的影响。由点云数据分布特点可知, 噪声引入的离散点通常远离主体点云或者稀疏分布在主体点云周围, 而主体点云的分布则相对集中、密度较高。为降低数据存储空间, 首先对原始数据进行均匀下采样, 点云可视化如图 2 所示。

然后利用统计滤波算法剔除偏离点云主体的离散点, 点云可视化如图 3 所示。

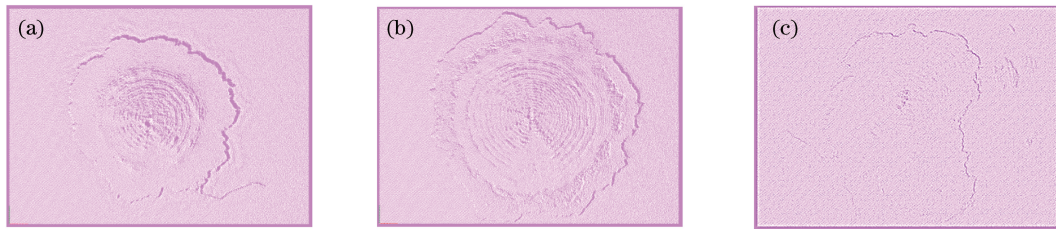


图 2 下采样后点云可视化效果。(a) 1 号样品; (b) 2 号样品; (c) 3 号样品

Fig. 2 Visual effect of point cloud after down-sampling. (a) Sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3

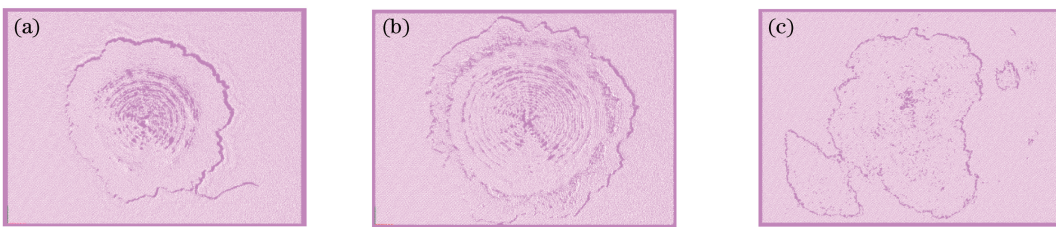


图 3 统计滤波后点云可视化效果。(a) 1 号样品; (b) 2 号样品; (c) 3 号样品

Fig. 3 Visual effect of point cloud after statistical filtering. (a) Sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3

最后利用半径滤波算法剔除点云主体内的无关点, 点云可视化如图 4 所示。

执行上述操作后, 点云数量的变化如表 1 所示。

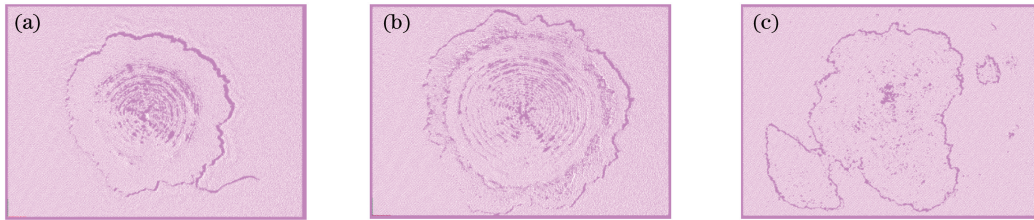


图 4 半径滤波后点云可视化效果。(a) 1 号样品;(b) 2 号样品;(c) 3 号样品

Fig. 4 Visual effect of point cloud after radius filtering. (a) Sample 1; (b) sample 2; (c) sample 3

表 1 点云数据的变化情况

Table 1 Changes of point cloud data

Sample No.	Original point cloud	Down-sampling	Statistical filtering	Radius filtering
Sample 1	1400832	140084	135240	135127
Sample 2	1400832	140084	134766	133865
Sample 3	1400832	140084	135653	134790

### 2.3 损伤表面三维重构模型的建立

三角剖分是一种应用广泛的表面重构技术,基本思想是遵循某种方式,将点集中散乱分布的点剖分成一系列互不相交的三角形,且所有三角形的合

集是该点集的凸包,如图 5 所示。Delaunay 三角剖分(DT)是一种优化的三角剖分,即平面域上的点集有且仅有一种三角剖分,使所有三角形的最小内角和最大<sup>[16]</sup>。

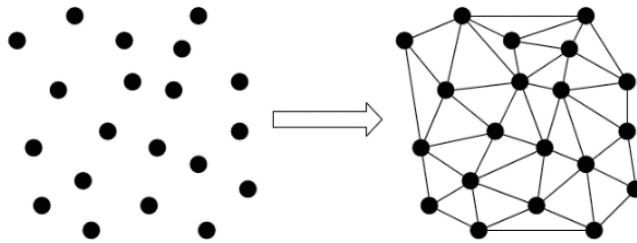


图 5 三角剖分示意图

Fig. 5 Schematic of triangulation

由于三维空间中的点云任意一点所在的局部区域可近似为平面,可以将三维局部空间的点云投影到二维平面上进行数据处理,再将平面点云间的拓扑关系一一映射到三维空间,得到最终的点云模型,该方法能够提高点云数据处理的效率,降低点云处理的复杂度<sup>[17]</sup>。因此基于二维的 DT 法,采用 Bowyer 提出的逐点插入式构网思想<sup>[18]</sup>建立损伤表面的三角网格模型。算法实现步骤如下。

1) 对所有散点按照  $x$  轴坐标分量大小进行排序。

2) 构造一个包围盒(超级三角形),如图 6 所示,保证所有散点都在其内部。

构造包围盒的步骤如下。

a) 构造矩形  $ABCD$ ,将所有散点包围。各点坐标信息为  $A(x_{\min}, y_{\max}), B(x_{\min}, y_{\min}), C(x_{\max}, y_{\min}), D(x_{\max}, y_{\max})$ 。

b) 沿垂直平分线  $EF$  将该矩形一分为二,找到

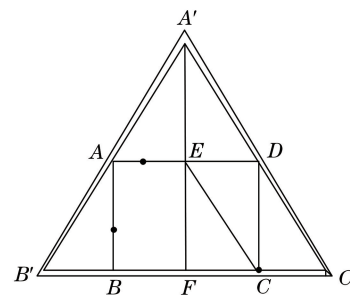


图 6 构造包围盒示意图

Fig. 6 Schematic of constructing bounding box

小矩形的对角三角形  $\triangle EFC$ ,根据相似三角形定理,将三角形扩大 1 倍得  $\triangle A'FC'$ ,同理可得  $\triangle A'FB'$ ,最终构造  $\triangle A'B'C'$ 。各点坐标信息:设  $x_{\text{mid}} = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}$ ,则  $E(x_{\text{mid}}, y_{\max}), F(x_{\text{mid}}, y_{\min}), A'[x_{\text{mid}}, y_{\max} + (y_{\max} - y_{\min})], B'\{2x_{\text{mid}} - [x_{\max} + (x_{\max} - x_{\text{mid}})], y_{\min}\}, C'[x_{\max} + (x_{\max} - x_{\text{mid}}), y_{\min}]$ 。

c) 为保证所有散点均被包围盒包含,以

$\Delta A'B'C'$  的重心为基点对其进行适当放大。

3) 将所有散点依次插入到构造的超级三角形中。假设插入点  $P$ , 则需寻找点  $P$  所在的三角形, 并搜索邻近的三角形进行空外接圆检测, 将外接圆中包含点  $P$  的三角形 3 条边全部删除, 然后依次连接点  $P$  与三角形的所有顶点, 形成点  $P$  的 Delaunay 三角网格。

其中, 检测点  $P$  是否在三角形外接圆内的方法如下。

a) 已知三角形的 3 个顶点, 求其外接圆。设顶点坐标分别为  $(x_0, y_0)$ 、 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ , 外接圆圆心为  $(x, y)$ , 半径为  $R$ , 则有

$$\begin{cases} (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \\ (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = R^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = R^2 \end{cases} \quad (7)$$

两两相减, 可得圆心坐标为

$$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} = \frac{[(x_1^2 + y_1^2) - (x_0^2 + y_0^2)] \begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ 2(y_1 - y_0) \end{bmatrix} - [(x_2^2 + y_2^2) - (x_1^2 + y_1^2)] \begin{bmatrix} x_0 - x_1 \\ 2(y_1 - y_0) \end{bmatrix}}{2(x_1 - x_0)(x_2 - x_1) - 2(y_1 - y_0)(y_2 - y_1)} \quad (8)$$

求解圆心坐标后, 可求得外接圆半径为

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (9)$$

b) 判断点  $P$  是否在外接圆内。设点  $P$  坐标  $(x_P, y_P)$ , 由两点间距离公式, 得点  $P$  到圆心  $(x, y)$  的距离, 表达式为

$$L_P = \sqrt{(x_P - x)^2 + (y_P - y)^2} \quad (10)$$

若  $L_P < R$ , 则点  $P$  在该外接圆内部; 若  $L_P = R$ , 点  $P$  在外接圆上, 出现“退化”现象; 若  $L_P > R$ , 则点  $P$  在外接圆外部。

4) 删除构造的包围盒, 循环操作步骤 3), 直至所有散点全部插入到三角网格内部, 最后将三角网格中和包围盒三顶点重合的三角形全部删除。

以对三个点进行逐点插入的 Delaunay 三角剖分为例进行说明, 实现流程如图 7 所示。

采用以逐点插入式构造三角网格模型的方法, 依次对所有采样数据执行上述操作, 即对点所在的三角形进行外接圆检测, 判断点是否在外接圆内, 然后决定三角网格的连接方式, 循环操作直至遍历所有点, 便可以实现对损伤表面三维微观形貌的重构。

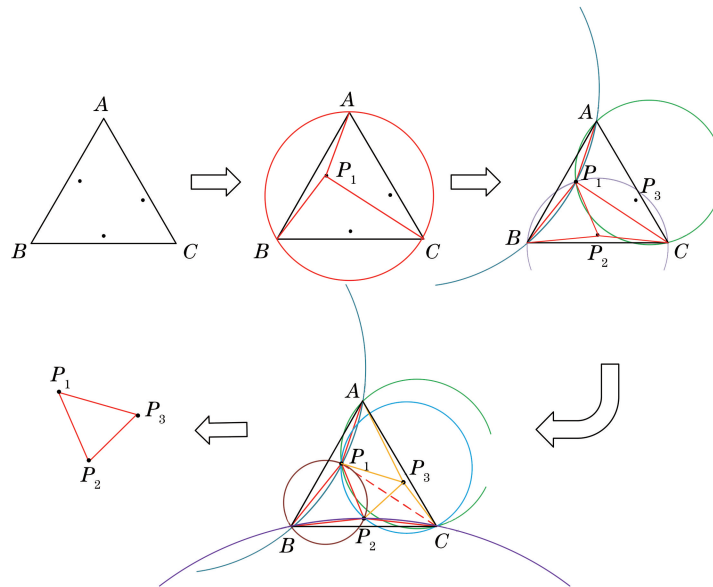


图 7 以 3 个点为例的模型示意图

Fig. 7 Schematic of model taking three points as an example

### 3 损伤表面的三维仿真重构和重构效果评价

#### 3.1 仿真重构

在 Windows10 系统、VS 2010 软件配置 VTK

的开发环境下, 利用 C++ 编程对建立的损伤模型实现可视化仿真, 重构得到 3 个测试样品的损伤表面三维微观形貌图。

1 号样品的重构结果如图 8 所示。1) 1 号样品损伤区域直径约 0.9 mm, 损伤区域高度的峰谷值约 1.155  $\mu\text{m}$ 。2) 损伤整体形貌为圆形坑状凹陷。

根据王涛<sup>[19]</sup>的描述,分析原因是薄膜材料的本征吸收、制备和使用过程中产生的杂质和缺陷,在多次且相对集中于一定小范围的激光能量作用下薄膜与基底材料间产生了热应力。特别是残留在薄膜表面和亚表面的各种缺陷会改变薄膜的局部电场强度,膜层的温度分布随之发生变化,膜层内部的温升使该区域发生膨胀现象并改变力学场,当力学场的强度超过其临界值时,薄膜会发生宏观损坏。3)中心区域向外有环状损伤痕迹扩展现象。根据邱荣<sup>[20]</sup>的描述,分析原因是薄膜最初的损伤区域在温度最高的激光光斑中心处向四面八方扩展,随着脉冲数目的增加,发生膜层炸裂脱落现象的同时,熔融态的表

面物质会以冲击中心为振源向外传播,冷却后固化形成凸起。4)中心点附近出现鼓包,而在其近似等距离范围内,膜层大多发生了剥离。根据余霞等<sup>[21]</sup>的描述,分析原因是节瘤缺陷的存在,在激光作用下周围的膜料迅速发生气化,而节瘤来不及全部气化最后被保留下来,鼓包是脉冲累积作用的结果。5)损伤区域有裂纹存在。根据文献<sup>[20]</sup>的描述,分析原因是强冲击波压力的作用。6)损伤区域边缘处陡度变化较大,四周有毛刺。根据文献<sup>[19]</sup>的描述,分析原因是激光作用导致薄膜与基底之间产生较大的温度差异,从而导致薄膜发生热形变和热熔融。

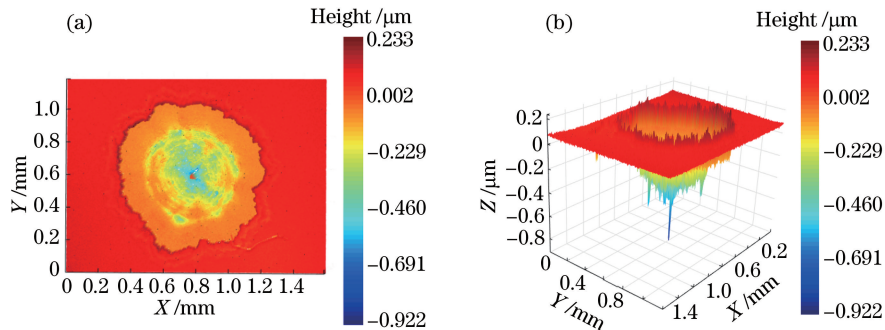


图 8 1 号样品重构结果。(a)重构二维平面效果;(b)重构三维立体效果

Fig. 8 Reconstruction results of sample 1. (a) Reconstructed 2D effect; (b) reconstructed 3D effect

2 号样品的重构结果如图 9 所示。由图 9 可知:2 号样品损伤区域直径约 1.1 mm,峰谷值约  $1.02 \mu\text{m}$ ;与 1 号样品损伤表面整体形貌相似,且环状凸起损伤痕迹扩展现象更明显,分析原因是薄膜与基底之间的结合不够紧密、牢固,激光作用时产生

的热应力较大,造成薄膜脱落和熔融态物质向外扩散现象严重<sup>[20]</sup>;2 号样品损伤中心区域附近也有鼓包,损伤区域内部有裂纹,边缘处陡度变化较大,局部有较多的凸起毛刺,起伏较大,产生原因与 1 号样品一致。

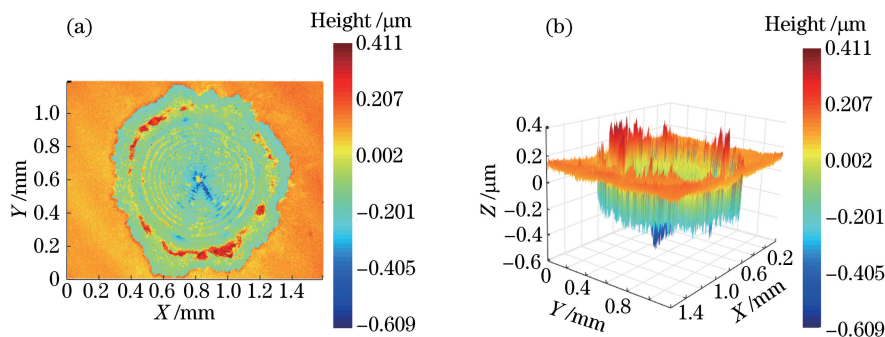


图 9 2 号样品重构结果。(a)重构二维平面效果;(b)重构三维立体效果

Fig. 9 Reconstruction results of sample 2. (a) Reconstructed 2D effect; (b) reconstructed 3D effect

3 号样品的重构结果如图 10 所示。由图 10 可知:3 号样品损伤区域的深度在三个测试样品中最深,峰谷值达  $1.469 \mu\text{m}$ ;与 1、2 号样品重构结果相比,3 号样品的损伤形貌呈现不规则的坑状凹陷,结合文献<sup>[19]</sup>中描述,分析原因是激光辐照过程中力在转换为热能的同时,将部分冲击力作用在薄膜表

面,原本固定在支撑架上的样品受到冲击后发生晃动,导致激光作用点偏移,形成不规则的连通损伤区域;同 1、2 号样品重构结果相似,3 号样品损伤中心区域附近有鼓包,损伤区域内部裂纹较多,边缘处陡度变化较大,四周有毛刺。

根据测试样品的重构结果,可以得出以下结

论：在激光作用下，光学薄膜内发生热破坏和热致应力破坏，导致薄膜损伤表面出现形态各异的微观形貌，如深坑、鼓包、毛刺及裂纹等，且损伤形貌随机性较大，无规律可循；在实验测试范围、薄膜基底未被打穿前提下， $\text{HfO}_2$  薄膜的损伤区

域呈坑状凹陷，损伤形貌不规则，内部有鼓包、裂纹存在，边缘处陡度变化大、毛刺多；建立的重构算法重复性好、适用性强，对单一和连通区域的损伤表面都能进行仿真重构，再现损伤表面的细微形貌特征。

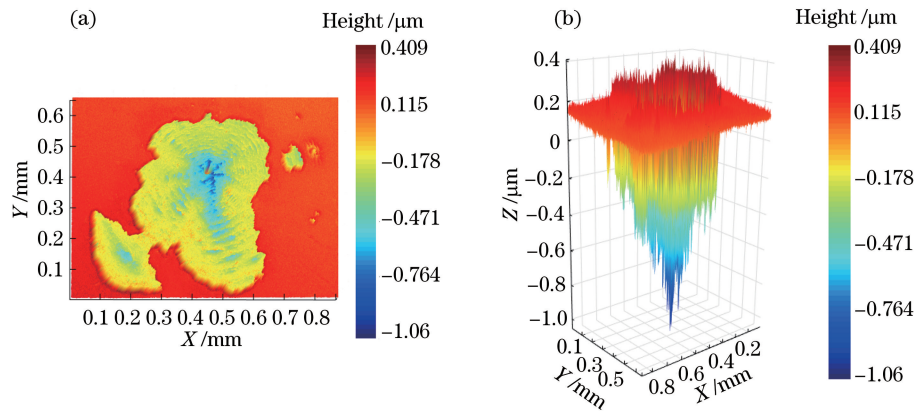


图 10 3 号样品重构结果。(a) 重构二维平面效果；(b) 重构三维立体效果

Fig. 10 Reconstruction results of sample 3. (a) Reconstructed 2D effect; (b) reconstructed 3D effect

### 3.2 重构效果评价

利用 VEECO Vision 软件处理所得损伤表面三维形貌图，对 Taylor-Hobson (T-H) 非接触式轮廓仪测试结果和重构图像进行对比，并对重构效果进行评价。

图 11 为 1 号样品的仪器测试结果。由图 11 (a)、(b) 可以看出：由于损伤区域相邻高度存在约  $90^\circ$  的极端现象，受仪器分辨率和测量原理制约，软件处理结果和轮廓仪测试结果中损伤区域的形貌

信息均未被完全获取，但整体形貌仍与重构图像相同；与仪器测试结果比较，重构的三维形貌图可以更加直观、全方位地再现损伤表面形貌特征，特别是陡度变化大处的细微形貌信息。图 11(c) 为利用 T-H 轮廓仪配套软件处理所得的损伤区域剖面轮廓线图。对比重构图像的峰谷值和仪器测量结果的最大截面高度 (Pt) 值，两数值差 2.5 nm，分析原因是仪器测量过程中损伤区域的部分数据信息未被采集。结合激光损伤光学薄膜的特点，分

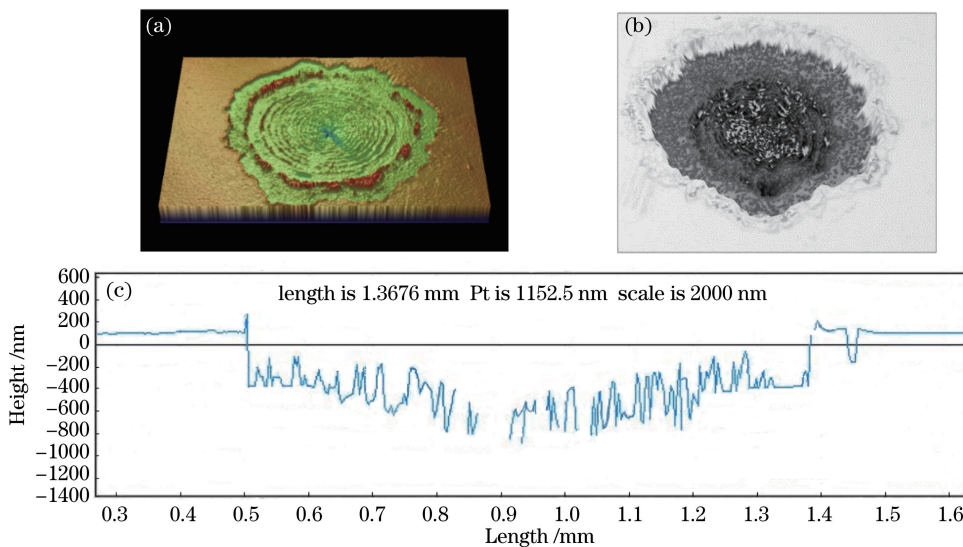


图 11 1 号样品的仪器测试结果。(a) Vision 软件处理所得形貌图；

(b) T-H 轮廓仪处理所得形貌图；(c) T-H 轮廓仪中软件处理所得剖面轮廓线

Fig. 11 Instrumental test results of sample 1. (a) Topographic map obtained by Vision software; (b) topographic map obtained by T-H profiler; (c) profile contour line obtained by T-H profiler' software

析可知,损伤区域中心点附近所受的激光辐照强度最高,损伤最严重,该区域内的最低点一定是谷

图 12 为 2 号样品的仪器测试结果。观察图 12 (a)、(b),仪器测量结果中的整体形貌与重构图像相同,重构图像的立体感更强。对比重构图像的峰谷值和图 12(c)所示的 Pt 值,两数值相差约 115 nm,原因与 1 号样品类似。结合图 12(b)、(c)可知,T-H 轮廓仪测试结果中损伤区域中心部位未被获取的细节信息较多,范围更大,因此对 Pt 值的计算影

深度最大值所在,而仪器测试结果恰好丢失此数据,因此对峰谷值的计算出现偏差。响较大。

如图 13 为 3 号样品的仪器测试结果。观察图 13(a)、(b),仪器测量结果中的整体形貌与重构图像相同,重构图像显示的形貌信息更详细、清晰。对比图 13(c)的 Pt 值和重构图像的峰谷值,两数值相差约 72 nm,原因与 1、2 号样品类似,即仪器测量过程中损伤区域的部分数据信息未被采集。

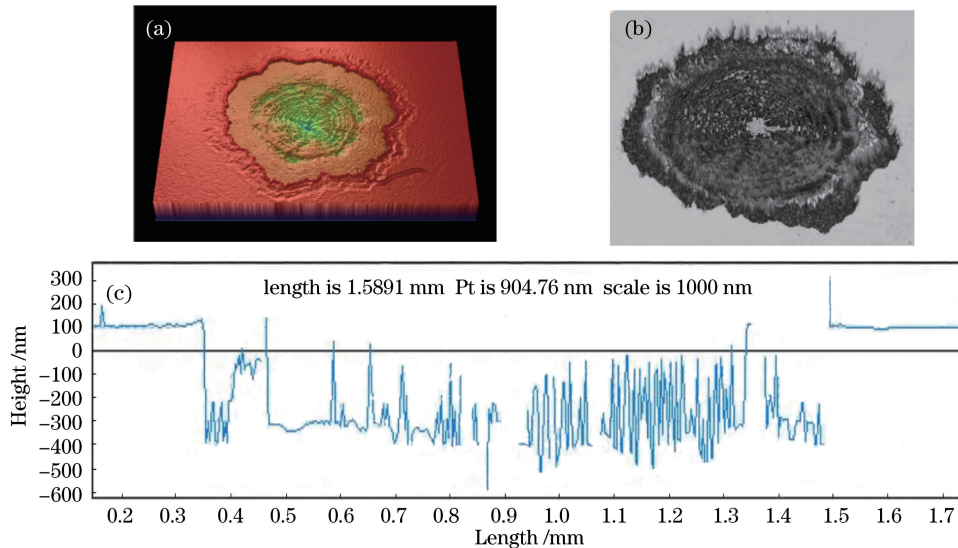


图 12 2 号样品的仪器测试结果。(a) Vision 软件处理所得形貌图;

(b) T-H 轮廓仪处理所得形貌图;(c) T-H 轮廓仪中软件处理所得剖面轮廓线

Fig. 12 Instrumental test results of sample 2. (a) Topographic map obtained by Vision software; (b) topographic map obtained by T-H profiler; (c) profile contour line obtained by T-H profiler's software

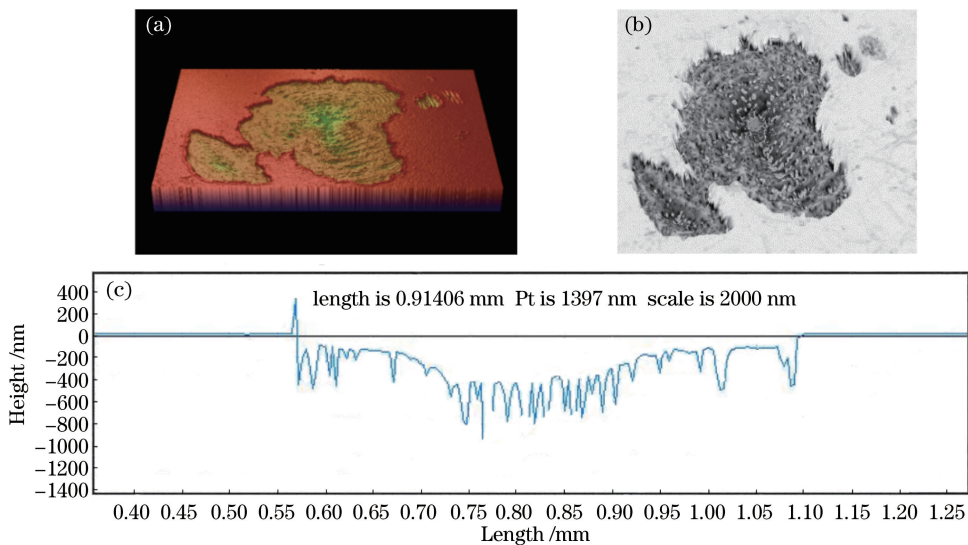


图 13 3 号样品的仪器测试结果。(a) Vision 软件处理所得形貌图;

(b) T-H 轮廓仪处理所得形貌图;(c) T-H 轮廓仪中软件处理所得剖面轮廓线

Fig. 13 Instrumental test results of sample 3. (a) Topographic map obtained by Vision software; (b) topographic map obtained by T-H profiler; (c) profile contour line obtained by T-H profiler's software



三维微观形貌测量仪器虽然能得到光学薄膜损伤表面的三维形貌图,但效果图只是孤立的三维外轮廓形貌图,且由于仪器分辨率和测量原理影响,存在形貌相互遮挡或数据无法全部采集的现象,忽视了隐藏在物体内部的微小损伤细节。相反,三维重构图像可以在立体显示损伤表面微观形貌的同时,给出损伤区域的三维坐标和深度分布信息;在强化立体感的基础上,将三维形貌测试仪器得到的多幅结果图的信息融合在一幅重构图像中,一方面可以方便研究人员详尽地观察和分析单幅图中的薄膜损伤信息,另一方面能减小计算机内存空间的占用。

## 4 结 论

通过获取  $\text{HfO}_2$  薄膜损伤表面的三维数据,建立重构模型,再现了光学薄膜损伤表面的三维微观形貌。研究表明:激光损伤的随机性导致光学薄膜的损伤形貌复杂;激光作用下,薄膜与基底、膜层之间发生了热破坏和热致应力破坏,导致损伤区域内有鼓包、裂纹、毛刺等形貌,损伤边缘陡度变化较大。这种非破坏性元器件表面损伤检测方法直观、立体地再现了损伤区域的三维细微形貌,在弥补三维形貌测量仪器测试结果立体感弱的同时,减小了存储空间。重构光学薄膜损伤表面的三维微观形貌有助于了解损伤原因和机理,探究激光损伤薄膜的过程;分析重构形貌的细微特征将给元器件易损伤部位的识别提供现实依据,据此改进制备工艺,提高薄膜的抗损伤性能;探究不同基底上同种薄膜的损伤情况,选择抗损伤性能高的最佳组合,可以延长薄膜的使用寿命。此外,重构三维微观损伤形貌是探索三维测量设备获取形貌的过程,是一种进行新产品开发和吸收及先进技术改进的重要手段。值得注意的是,由于激光器输出能量的不稳定,激光参数与损伤形貌之间的关系有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Cao Q K. Analysis and simulation of stress field effect of laser-induced optical thin films[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019: 3-6.  
曹乾坤. 激光诱导光学薄膜的应力场效应分析与仿真[D]. 西安: 西安工业大学, 2019: 3-6.
- [2] Dong J N, Fan J, Wang H Z, et al. Research progress in laser damage of high reflective optical thin films[J]. Chinese Optics, 2018, 11(6): 931-948.  
董家宁, 范杰, 王海珠, 等. 高反射光学薄膜激光损伤研究进展[J]. 中国光学, 2018, 11(6): 931-948.
- [3] Long G Y, Zhang Y P, Fan X L, et al. Deposition of high reflective films on deformable mirror for high power laser system[J]. Optical Engineering, 2020, 59(5): 057103.
- [4] Gao S S. Point cloud registration based on 3D laser scanner[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008: 13-17.  
高珊珊. 基于三维激光扫描仪的点云配准[D]. 南京: 南京理工大学, 2008: 13-17.
- [5] Qin X Y, Su D, Jia X Y, et al. Dislocation correction algorithm for adaptive laser confocal high-speed scanning microscopic imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0118001.  
秦小云, 苏丹, 贾新月, 等. 自适应激光共焦高速扫描显微成像错位校正算法[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0118001.
- [6] Merson E, Danilov V, Merson D, et al. Confocal laser scanning microscopy: the technique for quantitative fractographic analysis [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 183: 147-158.
- [7] Zhang J P, Sun H Y, Wang S L, et al. Three-dimensional reconstruction technology of subsurface defects in fused silica optical components [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0216001.  
张健浦, 孙焕宇, 王狮凌, 等. 熔融石英光学元件亚表面缺陷三维重构技术[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0216001.
- [8] Lu N, Xiao S, Hu X, et al. An innovative design of AFM for easily integrated with optical microscope [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11434: 114341C.
- [9] Tao C K, Wu Y J, Wang W Y, et al. Experimental investigation of white-light interferometry based on sub-dark-field illumination [J]. Optics Communications, 2019, 435: 108-117.
- [10] Guo T, Li F, Ni L F, et al. Microstructure surface topography measurement based on color images of white light interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0212003.  
郭彤, 李峰, 倪连峰, 等. 基于白光干涉彩色图像的微结构表面形貌测量[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0212003.
- [11] Cheng W, Li S K, Wang X Z, et al. Method for profile reconstruction of phase defects in extreme ultraviolet lithography mask [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1005001.  
成维, 李思坤, 王向朝, 等. 极紫外光刻掩模相位型缺陷的形貌重建方法[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1005001.
- [12] Zhou S. Research on measurement technology of tilted aspheric surface profile based on white light interference microscope [D]. Nanjing: Nanjing University

- of Science and Technology, 2015: 17-18.
- 周舒. 基于白光干涉显微镜的偏摆式非球面轮廓测量技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015: 17-18.
- [13] Su J H, Tian A L, Yang L H. Modern optical testing technology[M]. Beijing: Science Press, 2012: 163-178.
- 苏俊宏, 田爱玲, 杨利红. 现代光学测试技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 163-178.
- [14] Zhang S, Shi Y S, Gao S T, et al. Interference images processing in metrological white-light interferometry microscope[J]. Acta Metrologica Sinica, 2017(S1): 80-84.
- 张树, 施玉书, 高思田, 等. 计量型白光干涉显微镜干涉图像处理技术[J]. 计量学报, 2017(S1): 80-84.
- [15] Wang H S, Shi T L, Liao G L, et al. Profilometer based on interferometry and micro vision system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(7): 84-89.
- 王海珊, 史铁林, 廖广兰, 等. 基于干涉显微原理的表面形貌测量系统[J]. 光电工程, 2008, 35(7): 84-89.
- [16] Edelsbrunner H, Mücke E P. Three-dimensional alpha shapes[J]. ACM Transactions on Graphics, 1994, 13(1): 43-72.
- [17] He H. Research on triangle mesh surface reconstruction for scattered point clouds[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2018: 32-35.
- 何华. 散乱点云数据三角网格曲面重建研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2018: 32-35.
- [18] Bowyer A. Computing dirichlet tessellations[J]. The Computer Journal, 1981, 24(2): 164-166.
- [19] Wang T. Research on laser pretreatment and mechanisms of HfO<sub>2</sub> optical thin film[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014: 18-28.
- 王涛. HfO<sub>2</sub> 光学薄膜激光预处理及其机理研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2014: 18-28.
- [20] Qiu R. Study on damage of optical elements induced by intense laser[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2013: 26-33.
- 邱荣. 强激光诱导光学元件损伤的研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2013: 26-33.
- [21] Yu X, Xu J, Zhang B. Thermal melting damage of thin film components induced by surface impurities and nodule defects[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 1243003.
- 余霞, 徐娇, 张彬. 表面杂质和节瘤缺陷诱导薄膜元件热熔融损伤[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 1243003.