

# 理疗激光束能量分布的微观形貌测量\*

于复生<sup>1,3</sup> 艾兴<sup>2</sup> 张国雄<sup>1</sup>

(1 天津大学精仪学院精密测试技术及仪器国家重点实验室测控二室, 天津 300072)

(2 山东大学机械学院, 济南 250061) (3 山东建工学院机电系, 济南 250014)

**摘要** 利用投影光栅显微法对治疗近视眼的激光光束的能量分布进行了测量. 结果表明激光光束的能量在小范围内并不是均匀的高斯分布, 而是重重叠叠的无规则的峰-谷分布, 该三维形貌的测量及高度分布研究对研究激光治疗近视眼有重要意义.

**关键词** 光学测量; 投影光栅显微法; 理疗激光器; 激光光束能量分布; 三维微观形貌

**中图分类号** O432.2 **文献标识码** A

## 0 引言

随着激光技术的飞速发展, 激光器越来越多地应用到理疗方面, 其治疗优势显而易见. 但是对理疗激光束打击表面的能量分布一直没有进行准确的描述. 传统的 CCD 测量法在激光束的能量分布测量上有其应用的局限性. 对于理疗多模激光器持续打击某一表面, 由于激光束能量分布的不均匀, 将导致被打击表面的严重凸起和凹陷, 甚至带来严重的医疗事故. 本文采用所构建的显微投影光栅测量系统对某医院治疗近视眼所用的激光器的光束照射的有机玻璃片进行了间接的光束能量分布测量, 并给出了测量结果.

## 1 显微投影光栅法的检测原理

### 1.1 光学原理

本文对理疗激光器打击的有机玻璃表面应用光栅显微投影法进行了测量. 投影光栅法被广泛应用在宏观物体三维形貌的测量之中<sup>[1-5]</sup>, 图1为投影光栅相位法的光路结构简图. 投影光栅显微测量法是在宏观三维形貌测量的基础上, 把显微镜镜头放置在 CCD 镜头和光栅之前, 从而构成了微观三维形

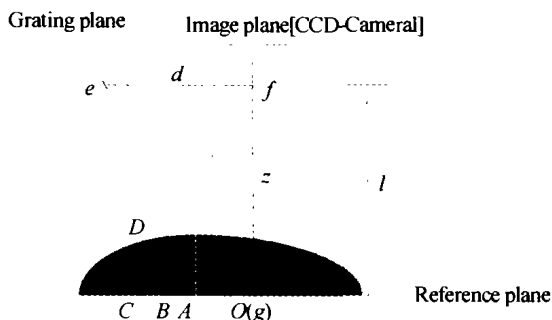
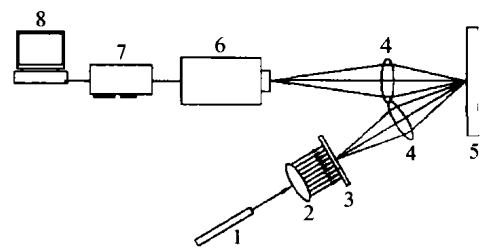


图1 光栅投影法原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of the grating projection method



1-laser, 2-beam expand lens, 3-sine grating, 4-microscope object lens, 5-measured plan, 6-CCD, 7-image collect card, 8-computer

图2 光栅显微投影系统图  
Fig. 2 Microscope diagram for system

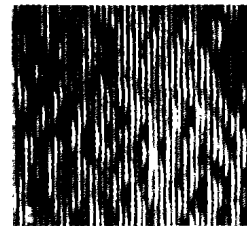


图3 激光束打击表面的光栅图像  
Fig. 3 Grating photos of laser beam irradiated surface

貌的测量系统. 图2为其关键部分的结构图. 激光光束1经3处的密集光栅和显微镜物镜4投射在有机玻璃5的右侧表面上, CCD1外接显微镜物镜4垂直拍摄有机玻璃表面. 从而拍摄到经过调制的明暗条纹如图3所示, 这些经过调制的条纹图包含有被理疗激光光束打击的表面高度形貌的全部信息.

### 1.2 相位法的二维频谱分析

如图1所示, 利用光学投影仪将条纹密度为10条/mm的正弦光栅投影到参考平面上, 当投影仪与参考平面间的距离很大并且投影光束与 CCD 轴线的夹角(图中 $\angle egf$ )很小( $\leq 15^\circ$ )时, 可认为投影仪发出的光束为平行光并且投影在参考平面上的条纹是等间隔的, 即条纹具有固定的空间周期. 则参考平面上的光强分布为<sup>[6]</sup>

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi fx) \quad (1)$$

式(1)中的 $I(x, y)$ 表示参考平面上的光强分布,  $a(x, y)$ 表示背景光强分布,  $b(x, y)$ 为条纹光强变化的振幅,  $f = 1/p$ 表示投影光栅的基频,  $p$ 是条纹宽度在图像监视器上所占的像素数,  $2\pi fx$ 表示光波前的

\*国家自然科学基金(批准号:50075064)  
Tel:022-27407740 Email:romeatrol@163.com  
收稿日期:2004-02-24

相位分布(因本实验中光栅投影垂直于水平方向,故 cos 项无  $y$  分量).

如果将正弦光栅投影到任意物体表面上,物体表面上的光强分布为

$$I_1(x, y) = a_1(x, y) + b_1(x, y) \cos [2\pi fx + \phi(x, y)] \quad (2)$$

式(2)中的  $I_1(x, y)$  表示物体表面上的光强分布,  $a_1(x, y)$  表示背景光强分布,  $b_1(x, y)$  为条纹光强变化的振幅,  $f$  意义同上, 而  $\phi(x, y)$  为物体高度分布  $h(x, y)$  引起的相位调制. 在远心投影光路条件下, 考虑到实际测量中  $l \gg h(x, y)$ , 被测物体表面的高度分布和调制相位的关系为

$$\phi(x, y) \approx (2\phi fd/l) h(x, y) \quad (3)$$

对应于图 1 中,  $d/l = \cot(\angle fge)$ , 又  $f = 1/p$ , 式(3)可转化为

$$\phi(x, y) \approx 2\pi \cot(\angle fge) h(x, y) p^{-1} \quad (4)$$

对于式(2), 可改用复数形式来表示

$$I_1(x, y) = a_1(x, y) + c(x, y) \exp(j2\pi fx) + c^*(x, y) \exp(-j2\pi fx) \quad (5)$$

式中

$$c(x, y) = 2^{-1} b_1(x, y) \exp[j\phi(x, y)] \quad (6)$$

式(6)对  $x$  轴进行傅里叶变换, 得

$$G(f, y) = A(f, y) + C(f_x - f, y) + C^*(f_x + f, y) \quad (7)$$

其频谱图如图 5 所示(其中横向条纹为计算机处理时的背景, 非有用信息, 图 6 同). 由于  $a_1(x, y)$ 、 $b_1(x, y)$  相对  $f$  变化缓慢, 所以在频谱图中它们与基频是分开的, 而载频  $C(f_x - f, y)$  携带有用的相位信息. 选用指数滤波器进行滤波后得出载频分量  $C(f_x - f, y)$ , 平移到原点为  $C(f, y)$ , 如图 6 所示. 然后对其进行傅里叶逆变换, 得

$$c(x, y) = 2^{-1} b(x, y) \exp[j\phi(x, y)] \quad (8)$$

将式(8)用欧拉公式进行三角变换为

$$c(x, y) = 2^{-1} b(x, y) \{ \cos[\phi(x, y)] + j \sin[\phi(x, y)] \} \quad (9)$$

则  $\phi(x, y)$  为

$$\phi(x, y) = \arctan \left\{ \frac{\text{real} \left[ \frac{2c(x, y)}{b(x, y)} \right] / \text{image} \left[ \frac{2c(x, y)}{b(x, y)} \right]}{\text{image} \left[ \frac{2c(x, y)}{b(x, y)} \right]} \right\} \quad (10)$$

real、image 分别代表  $\frac{2c(x, y)}{b(x, y)}$  的实部和虚部. 上式中, 求反正切时, 由于其值域为  $-\pi \sim +\pi$ , 因而需要对其结果进行去包裹处理得到正确的  $\phi(x, y)$  值.

由式(4)得

$$h(x, y) = \phi(x, y) (p/2\pi) \tan(\angle fge) \quad (11)$$

把式(10)代入式(11)可解出物体表面高度场  $h(x, y)$ .

## 2 实验数据处理

对被激光光束打击的有机玻璃表面的实验数据进行处理. 实验数据处理的流程图如图 4 所示.

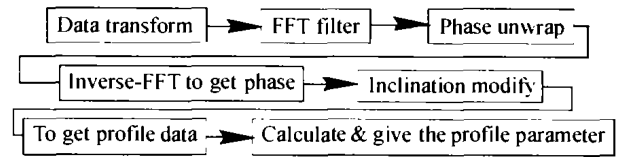


图 4 测量数据处理流程图

Fig. 4 Flowing chart of measurement data process

数据处理中的傅里叶变换和傅里叶逆变换、相位去包裹都是较常用的处理方法, 不再赘述. 被激光光束打击表面调制条纹的傅里叶变换、滤波平移和去包裹处理后的图像分别见图 5、图 6 和图 7.



图 5 二维傅里叶变换结果图像

Fig. 5 2D FFT results



图 6 移相和滤波后的图像

Fig. 6 Results after filtering and moving



图 7 去包裹处理后的图像

Fig. 7 Phase graph for unwrapping

## 3 实验分析

### 3.1 图像采集系统组成

本文所做的测量在 P4-550 计算机上实现, 采用 1881 型 512 × 512 像素的 CCD 摄像机、中科院自动化研究所的 P540 图像采集卡和 TC1910 型监视器、白炽灯泡光源、三维精密工作平台及其它辅助设备完成的. 整套软件由 Visual C++ 6.0 编制, 采用 Windows98 界面. 采用 Windows 编程, 程序可用虚拟内存, 数组可分配几兆的空间, 非常适合于做数字图像处理, 测量结果的可视化处理由 MATLAB 完成.

### 3.2 测量结果分析

本激光器进口时带有一份国外公司测量的数

据. 其表达为某一条线的表面高度起伏, 在 6.5 mm 的长度上取 100 点, 描述了其表面粗糙度, 其测量结果为 4  $\mu\text{m}$ . 采用本系统在 480  $\mu\text{m}$   $\times$  360  $\mu\text{m}$  的面积上采样 512  $\times$  512 点, 测得的平均高度为 4.1  $\mu\text{m}$ , 标准差为 0.4  $\mu\text{m}$ . 若排除国外公司取样较长的因素, 就可认为测量结果具有较好的一致性. 同时从标准差的角度分析, 以 100 个点抽样 6.5 mm, 数据仍有较大的波动性. 本系统测得的数据超过 25 万个, 给出的测量值相比具有更高的可靠程度. 被光束照射表面的三维微观形貌如图 8 所示.

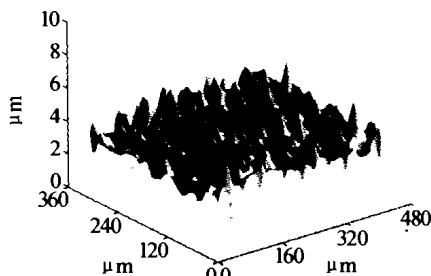


图 8 被测表面三维高度重建图

Fig. 8 3D reconstruct graph of measurement surface

#### 4 结论

通过对激光束打击的有机玻璃的三维微观形貌测量, 我们得出结论, 即该理疗激光器光束治疗近视眼的能量分布并不是传统认为的高斯分布, 而是具有复杂的峰-谷分布. 这说明, 激光多模光束由于其随机性, 导致了光束所打击面的高度不均匀, 这要求

在进行激光治疗近视眼时应使激光光束具有一定的旋转, 使光束的能量分布有一定的变化, 以达到激光光束照射表面的高度一致性, 提高治疗效果.

#### 参考文献

- 1 Tang Shouhong, Hung Y Y. Fast profile meter for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl Opt*, 1990, **29**(20): 3012 ~ 3018
- 2 Mitsuo, Takeda, Kazuhiro Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl Opt*, 1983, **22**(24): 3977 ~ 3982
- 3 Herraes M A, Burton D R, Lalor M J. Accelerating fast Fourier transform and filtering operations in Fourier analysis for accurate measurement of three-dimensional surfaces. *Optics and Laser in Engineering*, 1999, **31**: 135 ~ 145
- 4 Poon Ting-chung. Optical image recognition of three-dimension objects. *Appl Opt*, 1999, **38**(2): 370 ~ 381
- 5 Zhou Xiang. Fringe-orientation estimation by use of a Gaussian gradient filter and neighboring-direction averaging. *Appl Opt*, 1999, **38**(5): 795 ~ 804
- 6 徐建强, 王蕴珊. 三维形貌检测的自动参考栅象法研究. *光子学报*, 1998, **27**(6): 553 ~ 557
- 7 Xu J Q, Wang Y S. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(6): 553 ~ 557
- 7 王勋法. C 语言图像编程. 合肥: 中国科技大学出版社, 1994. 226 ~ 228  
Wang X F. C programming for image process. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1994. 226 ~ 228
- 8 Lou Huazhou, Zhang E. Measurement of surface roughness with microcomputer. Selected proceedings of precision measurement for geometrical quantities. Beijing: Metrologica Sinica Press, 1989. 9 ~ 16

### 3D Micro-Profile Measurement for Energy Distribution of Physical Therapy Laser Beam

Yu Fusheng<sup>1,3</sup>, Ai Xing<sup>2</sup>, Zhang Guoxiong<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072

2 School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061

3 Dept. of Mechatronics, Shandong Institute of Architecture and Engineering, Jinan 250014

Received date: 2004-02-24

**Abstract** The method of grating-projection was used to measure the energy distribution of a laser beam indirectly. The result showed that the energy's distribution of the laser beam was composed of many peaks and vales in random instead of even Gauss distribution in small scope. The study on the micro-3D-profile measurement played a important role in myopia treatment utilizing laser beams.

**Keywords** Optical measurement; Micro-grating projection; Physical therapy Laser; Laser beam energy distribution; 3D-micro-profile



**Yu Fusheng** was born on September 20, 1969, in Shandong Province, China. He graduated as a M. S. student from Mechanical College of Shandong University of Technology in 1997, then got his Doctor degree from Mechanical School of Shandong University in 2000. From then on, as a teacher and a associate professor of Department of Mechatronics of Shandong Institute of Architecture and Engineering, he applied himself to the research and application in the engineering in the area of laser measurement and industry robot. Now, he is a post doctor of the State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments of Tianjin University.