

文章编号: 0258-7025(2010)02-0572-05

高功率激光器光学元件镀膜前后评价参数探讨

胡达飞^{1,2} 邵淑英¹ 方明^{1,2} 齐红基¹ 易葵¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院强激光材料科学与技术重点实验室, 上海 201800)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 利用 ZYGO Mark III-GPI 干涉仪对 120 mm×88 mm 元件镀膜前后进行了面形测量, 获得了峰谷值(PV)和均方根梯度(GRMS), 并对镀膜前后的 PV, GRMS 值进行了比较, 发现镀膜后 PV, GRMS 值分别有所增加, 同时对两者进行了线性拟合, 结果表明两者在一定程度上存在着线性关系, 并从理论上进行了模拟论证。同时对个别样品进行了功率谱密度(PSD)分析, 发现镀膜后 PSD 曲线较镀膜前有所升高, 这与基片的抛光程度以及镀膜过程有着密切联系。

关键词 表面光学; 表面形貌; 峰谷值; 均方根; 均方根梯度; 功率谱密度

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103702.0572

Study of the Evaluation Parameter of Optical Components before and after Coating in the High Power Laser System

Hu Dafei^{1,2} Shao Shuying¹ Fang Ming^{1,2} Qi Hongji¹ Yi Kui¹

¹ Key Laboratory of Material Science and Technology for High Power Lasers,
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The surface figures of 120 mm×88 mm samples were measured by ZYGO Mark III-GPI interferometer before and after coating. The analyzed of peak to valley (PV) and gradient of root mean square (GRMS) show that PV and GRMS increased, respectively, after deposition. At the same time, GRMS increased with the increase of PV, which also can be confirmed from the theoretical calculation. In addition, the power spectral density (PSD) of several samples are also shown. The results indicate that the curves ascend after coating, which relates closely with the substrate and deposition condition.

Key words optics at surfaces; surface profile; peak to valley; root mean square; gradient of root mean square; power spectral density

1 引言

近年来, 在高功率激光技术的发展中^[1], 一个重要特点是众多大口径、高精度光学元件的采用, 如在激光产生、放大、聚焦过程中所用到的各种透镜、调制晶体等, 这就对光学元件的表面形貌提出了更多的限制和要求, 因为这将会影响到激光在传输过程中产生的损耗以及光束的聚焦打靶, 而且在激光产生放大过程中, 不仅是各种调制器件会对激光产生调制, 其中的镜片如果呈现某些周期性结构也会对

激光产生调制, 从而对激光器造成额外的损害, 所以光学元件表面形貌的控制对于激光技术的发展有着重要的意义。

光学镀膜元件的表面形貌按照畸变波前空间调制周期 L 的大小可划分为^[2]:

1) 高频段, 周期小于 0.12 mm, 相当于微观粗糙度, 高频段波前误差会引起部分光的散射, 从而引起激光能量的损失, 一般用均方根(RMS)作为评价参数。

收稿日期: 2009-02-20; 收到修改稿日期: 2009-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(10704078)和青年科学基金资助项目。

作者简介: 胡达飞(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学薄膜测试技术方面的研究。E-mail: zjdyhudf@yahoo.com.cn

导师简介: 易葵(1970—), 男, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: ky@opfilm.com

2) 中频段, 周期在 0.12~33 mm 之间, 中频段的波前误差会引起较大的强度峰值, 对光学元件造成破损, 一般用功率谱密度(PSD)作为评价参数。

3) 低频段, 周期大于 33 mm, 相当于空间域波面面形。低频段波前误差的存在会引起激光束的偏离, 降低会聚光束的能量并影响激光光斑的形状, 从而影响高功率激光系统的聚焦打靶, 一般用峰谷值(PV)和均方根梯度(GRMS)作为评价参数。

2 各评价参数的介绍及计算

对于光学镀膜元件面形的控制主要有以下几种评价参数:

1) PV 对应于上述的低频段, 反映波前的总体畸变, 即样品的整体形貌, 但不能提供细节信息。

2) RMS 对应于上述的高频段, 可由众多方法求得, 如采用干涉仪、散射仪测量等, 利用干涉仪得到的测量结果与样品长度、取样次数以及最小分辨率有关, 一般取样 6 次就足以表示该表面的粗糙度^[3], 测量得到高度数据后, 求得的方法就可以表示为^[4]:

在满足 $\sum_{i=1}^N z_i = 0$ 条件下, 可求 $\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2}$, 其中 z_i 为第 i 个取样点的高度, N 为总的取样点数。

3) GRMS 用于表征波前低频成分, 反映波前各点相位变化, 差值越大则说明波前的起伏越大, 所以能直观地表示出光束聚焦特性与光束波前分布的关系, 一般可用标准五点法计算^[5]。计算时可分为非边缘点和边缘点(图 1, 图 2), 两者的计算公式分别为

$$g_0 = \frac{y_{-2} - y_2 + 8y_1 - 8y_{-1}}{3(x_2 - x_{-2})}, \quad (1)$$

$$g'_0 = \frac{-25y_0 + 48y_1 - 36y_2 + 16y_3 - 3y_4}{3(x_4 - x_0)}, \quad (2)$$

式中 x 值为各取样点的坐标位置, 在本文中单位取为 cm, y 为各点的相位, 也就是测量时得到的面形值, 以波长 λ 为单位, 故 GRMS 单位为 λ/cm 。

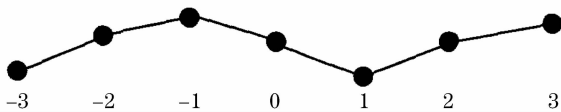


图 1 非边缘点

Fig. 1 Point away from edge

4) PSD 是光学元件表面空间分布的傅里叶变换与其相应的空间频带宽之间的比值, 也就是用一系列不同振幅、周期、相位的正弦(或余弦)函数来拟

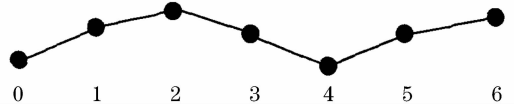


图 2 边缘点

Fig. 2 Point near edge

合面形表面的高度分布, 直观地表示各种调制周期的分布, 故能反映焦斑旁瓣的能量分布、光散射及非线性效应等特性, 一般众多商业干涉仪都可直接计算, 但受到带宽的限制^[6]。并且 PSD 与 RMS 有联系: 对于某特定频段的 PSD, 它的积分恰是该频段 RMS 的平方^[7], 可以用来验证所求 PSD 的正确性。PSD 的计算公式为

取样点连续时, 即理想情况下

$$z(k) = \int_0^L z(x) \exp(-ikx) dx, \quad (3)$$

取样点离散时, 即实际测量中

$$\hat{Z}(m) = \Delta x \sum_{n=0}^{N-1} z(n) \exp(-2\pi imm/N), \quad (4)$$

最后可求

$$f_{\text{PSD}} = \langle |Z(m)|^2 / (N\Delta x) \rangle, \quad (5)$$

式中 Δx 为取样间距, N 为取样数, L 为取样长度, $z(n)$ 为第 n 点的高度, m/L 为组成表面的空间频率。

3 测试结果与讨论

对 120 mm × 80 mm 元件进行了测量, 所用仪器为 ZYGO Mark III-GPI 干涉仪, 分析软件为 Metropro 8.1.0。

图 3 为镀膜前后 PV 值的变化; 图 4 为镀膜前后 GRMS 值的变化; 图 5 为镀膜后去离焦得到的 GRMS 与 PV 的关系图; 图 6 为模拟薄膜的 PV 和 GRMS 的线性拟合。

由图 3 可知, 镀膜后样品的 PV 值相对基片将有所增大, 图 4 则同样表明镀膜后 GRMS 值相对基片有所增大。PV, GRMS 的变化是由于镀膜过程中, 薄膜沉积于基片上使这一整体产生结构性的变化, 导致应力的产生, 再使基片产生形变弯曲所造成的^[8]。

镀膜后 PV 和 GRMS 的同时增大表明两者之间可能存在线性关系, 这也可由图 5 验证, 图 5 以 PV 值为横坐标, GRMS 为纵坐标, 直线为线性拟合曲线, 表明 PV 值越大, 样品面形的起伏也大, 故使 GRMS 值相应增大。为验证这一结果, 通过计算机模拟产生 8 个 128 mm × 88 mm 的随机矩阵, 分别近

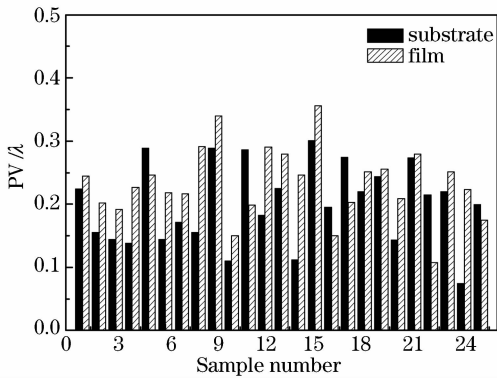


图3 镀膜前后 PV 值比较

Fig. 3 Value of PV before and after coating

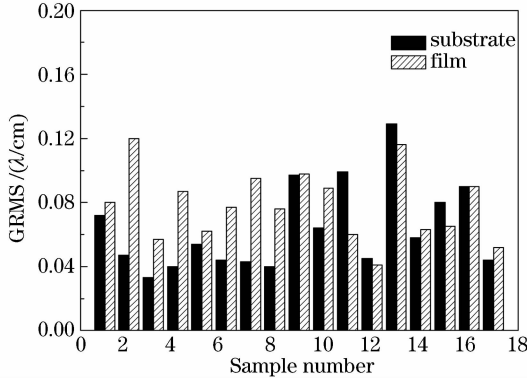


图4 镀膜前后 GRMS 值比较

Fig. 4 Value of GRMS before and after coating

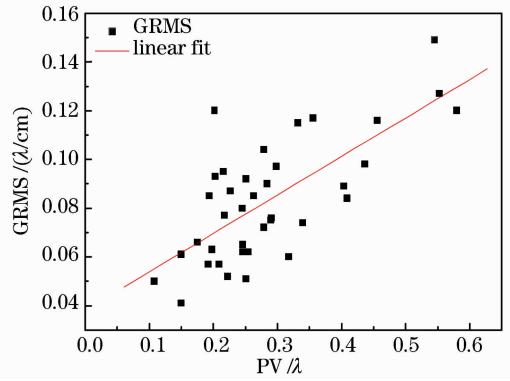


图5 GRMS 与 PV 关系图

Fig. 5 Relation between GRMS and PV

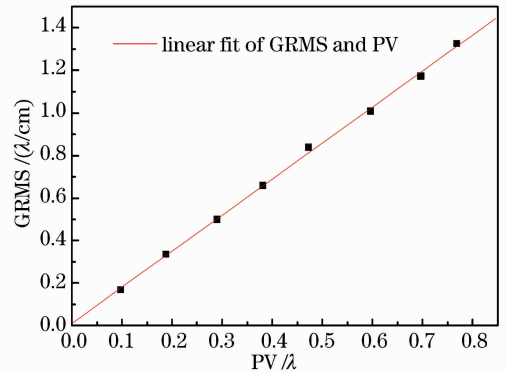


图6 模拟薄膜的 PV, GRMS 线性拟合

Fig. 6 Linear fit of PV and GRMS of simulation film

表1 模拟薄膜的 PV, GRMS 分布

Table 1 Value of GRMS and PV of simulation film

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8
PV/λ	0.0980	0.1879	0.2905	0.3817	0.4725	0.5970	0.6968	0.7687
GRMS/(λ/cm)	0.1678	0.3350	0.4994	0.6591	0.8379	1.0079	1.1716	1.3258

似为薄膜表面形貌的分布,控制 PV 值为一变量,再求得 GRMS 值,结果如表 1 所示。

图 6 进一步证实了 PV, GRMS 两者在一定程度上存在线性关系,这也可以从(1),(2)两式得知,当 PV 增加时,分母值(即取样点对应的间距)不变,分子增加,故导致 GRMS 的增大。图 6 的 GRMS 与图 5 相差很大,这是由于模拟过程中薄膜每点都是分立的,而实际薄膜各测量点则是相对连续的,故相位差较小,同时不同镀膜条件、不同基片都可能导致两者线性系数的差异,但可反映 GRMS 随 PV 的升高而升高的这一变化趋势。图 5 中拟合直线并未过原点, PV 为零时 GRMS 为 0.04,与理论计算不符合,这与测量时的系统误差和测量软件的计算方法不同有关。

图 7 为某一样品镀膜前后的一维 PSD 曲线,基底和样品的 PSD 分别通过 x, y 方向取样 10 次,再

求平均得到,即图中粗黑线所示;图 8 则为镀膜前后 4 个样品的 PSD 曲线比较。

图 7(a) 在 0.25 mm^{-1} 处出现一个 $2 \times 10^2 \text{ nm}^2 \cdot \text{mm}$ 的峰值,图 7(b) 在频率为 0.0375 mm^{-1} 和 0.25 mm^{-1} 处分别出现 $6 \times 10^2 \text{ nm}^2 \cdot \text{mm}$ 和 $1.5 \times 10^2 \text{ nm}^2 \cdot \text{mm}$ 的峰值,这些峰值的产生是由于基片抛光过程使基底呈现某些周期性的调制结构,图 7(b) 前者对应的空间周期为 26.67 mm ,后者则为 4 mm ,两者都处于中频段,如要扩展到高频段,则要提高仪器的测量分辨率。并且从图 7(a) 和 (b) 的比较可以看出,沿 y 方向的基片加工所引入的误差更小。

图 7(c) 和 (d) 为镀膜后的 PSD,相对图 7(a), (b) 的曲线更加光滑,但 PSD 值均有所上升,这也可以在图 8 的 4 个样品的 PSD 曲线中得到验证,这表明镀膜过程可以消除一些周期性调制误差,但并不

一定能提高薄膜相对于基底材料分布的均匀性, PSD 曲线的升高与基片的抛光技术有密切联系,抛

光曲面的粗糙程度将影响薄膜的沉积,同时镀膜过程中温度、气压等因素也会对薄膜沉积产生影响。

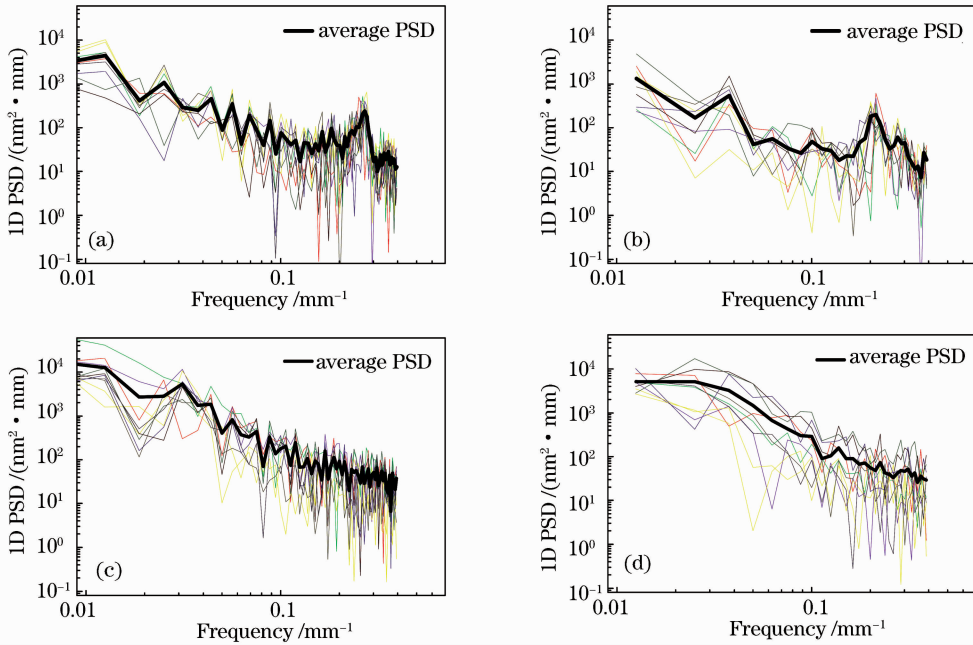


图 7 样品 PSD 曲线。(a) 衬底 x 方向;(b) 衬底 y 方向;(c) 薄膜 x 方向;(d) 薄膜 y 方向

Fig. 7 PSD of sample. (a) x direction of substrate; (b) y direction of substrate; (c) x direction of film; (d) y direction of film

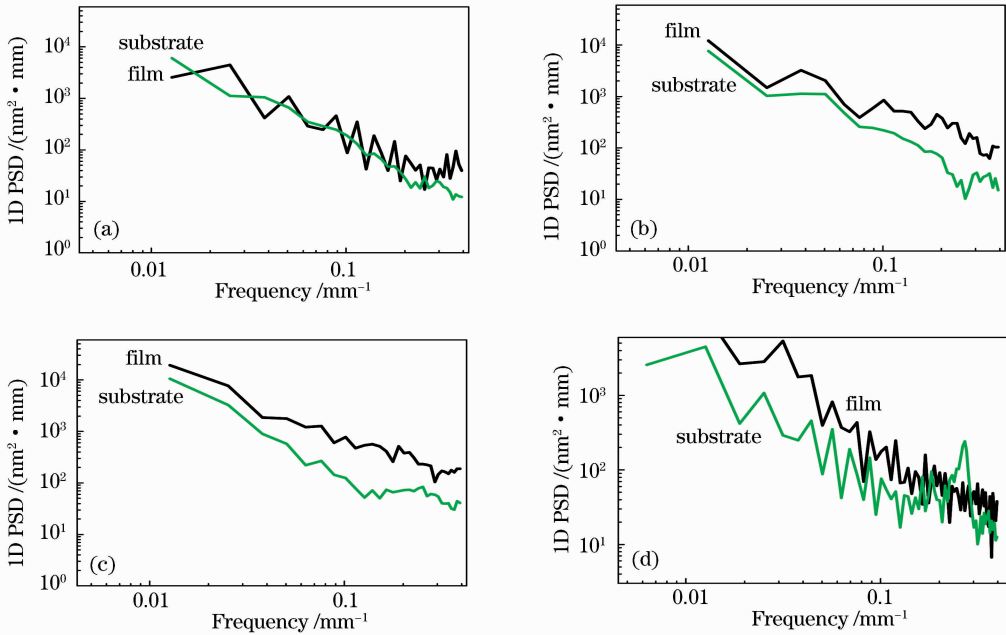


图 8 镀膜前后 PSD 比较

Fig. 8 Compare of PSD before and after coating

由以上可知,光学元件的 PV 和 GRMS 存在一定的线性关系,而 PSD 的分布与元件的制造工艺有密切的关系^[9],如小磨具的采用将引入较多波纹误差,这就会产生中频波段的误差,工艺的改进如采用

磁流变抛光技术将有助于提高基底的均匀性^[10],从而使 PSD 曲线得到改善,同时由于 PSD 的测量受到带宽的限制,故提高带宽,即增加仪器的分辨率,也是得到高质量 PSD 曲线的一个途径,如采用拼接

干涉测量技术^[11]。

4 结 论

介绍了大功率激光器中光学元件的各个评价参数,并对众多120 mm×88 mm元件镀膜前后进行了测量分析,获得了PV,GRMS值,表明两者存在线性关系,同时对个别样品进行了PSD分析,对大口径光学薄膜元件的表面形貌的控制进行了初步探讨。

参 考 文 献

- 1 Qiao Zhanfeng, Lu Xingqiang, Zhao Dongfeng *et al.*. Arrangement design of the final optics assembly for the SG-II upgrading laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9):1328~1332
乔战锋,卢兴强,赵东峰等.神光II升级装置终端光学组件的排布设计[J].*中国激光*,2008,**35**(9):1328~1332
- 2 C. R. Wolfe, J. K. Lawson. The measurement and analysis of wavefront structure from large aperture ICF optics [C]. *SPIE*, 1995, **2633**:361~385
- 3 Shen Weixing, Xu Deyan. The sample problem of the optical surface roughness measure [J]. *Optical Instruments*, 1997, **19**(1):1~7
沈卫星,徐德衍.测量光学元件表面粗糙度的取样问题[J].*光学仪器*,1997,**19**(1):1~7
- 4 Jean M. Bennett, Lars Mattsson. Introduction to Surface Roughness and Scattering [M]. Washington D. C.: Optical Society of America, 1989. 38~39
- 5 Wade H. Williams. NIF large optics metrology software: description and algorithms [R]. UCRL-MA-137950-REV-1, 2002. 18~19
- 6 D. M. Aikens. The origin and evolution of the optics specifications for the National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 1995, **2536**:2~12
- 7 J. K. Lawson, D. M. Aikens, R. E. English *et al.*. Power spectral density specifications for high-power laser systems [C]. *SPIE*, 1996, **2774**:345~356
- 8 Qiling Xiao, Shuying Shao, Jianda Shao *et al.*. Influences of Y₂O₃ dopant content on residual stress, structure, and optical properties of ZrO₂ thin films [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(2):162~164
- 9 Xu Qiao, Gu Yuanyuan, Chai Lin *et al.*. Measurement of wavefront power spectral density of large optical components [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3):344~347
许乔,顾元元,柴林等.大口径光学元件波前功率谱密度检测[J].*光学学报*,2001,**21**(3):344~347
- 10 Aric Shorey, William Kordonski, Marc Tricard. Magnetorheological finishing and sub-aperture stitching interferometry of large and lightweight optics [C]. *SPIE*, 2004, **5494**:81~90
- 11 Michael Bray. Stitching interferometry: side effects and PSD [C]. *SPIE*, 1999, **3782**:443~452