

# 不同干涉仪检测光学元件功率谱密度的比较

杨相会<sup>1,2</sup> 沈卫星<sup>1</sup> 张雪洁<sup>1</sup> 马晓君<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了探究不同干涉仪对中频误差的响应规律, 获得相对真实的功率谱密度 (PSD) 分布, 分别利用 4D AccuFiz、ZYGO DynaFiz 以及 ZYGO GPI 三台干涉仪检测周期性波纹和划痕样品, 并对一维实测 PSD 曲线进行对比分析。结果表明, 不同干涉仪对中高频信息的响应度不同; 干涉仪分辨率越高, 响应度越高。利用仪器传递函数 (ITF) 曲线对实测 PSD 分布进行了修正, 获得了较为真实的 PSD 分布。在某些频率范围内, 标定的 ITF 曲线和实际响应仍存在差异。

**关键词** 测量; 功率谱密度; 干涉仪; 中频波面误差; 仪器传递函数

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0904002

## Comparison Among Different Interferometers for Measuring Power Spectral Density of Optical Elements

Yang Xianghui<sup>1,2</sup> Shen Weixing<sup>1</sup> Zhang Xuejie<sup>1</sup> Ma Xiaojun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to investigate the response law of different interferometers to the mid-spatial frequency errors and obtain the relatively true power spectral density (PSD) distribution, the 4D AccuFiz, ZYGO DynaFiz and ZYGO GPI interferometers are respectively used to measure the periodic ripples and scratch samples, and the comparative analysis of the measured one-dimension PSD curves is made. The results show that the responsivities to the mid- and high-spatial frequency information are different for different interferometers, and the higher the interferometer resolution is, the higher the responsivity is. The instrument transfer function (ITF) curve is used to correct the measured PSD, and the truer PSD distribution is obtained. However, in the range of some frequency bands, there still exist some difference between the ITF curve and the practical response.

**Key words** measurement; power spectral density; interferometer; mid-spatial frequency wavefront error; instrument transform function

**OCIS codes** 120.4630; 120.3180; 120.4640; 120.5050

## 1 引言

为了尽可能地提高高功率固体激光装置的输出能量, 要求光学元件具有很高的波面质量<sup>[1]</sup>。根据大口径光学元件波面畸变对强激光束传输的影响, 波面误差可分为三个频段, 其中空间周期在 0.12~33 mm 频段的波面误差为中频波面误差<sup>[2]</sup>。中频波面误差严重威胁高功率激光系统的运行安全, 是光束非线性小尺度自聚焦的重要诱因, 会导致光束在系统终端形成焦斑旁瓣, 影响聚焦打靶<sup>[3-5]</sup>。基于傅里叶分析方法的波面功率谱密度 (PSD) 函数, 可以量化各个空间频率区间的误差, 评估中频波面误差<sup>[6-8]</sup>。

收稿日期: 2016-03-08; 收到修改稿日期: 2016-04-22

作者简介: 杨相会(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: yangxh\_yx@163.com

导师简介: 沈卫星(1970—), 男, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事高功率激光元件检测方面的研究。

E-mail: wxshen@mail.shenc.ac.cn(通信联系人)

目前主要使用数字移相干涉仪检测光学元件波面误差,通过傅里叶变换获得 PSD 函数分布。由线性系统理论可知,干涉仪可等效为低通滤波系统<sup>[9]</sup>。波面中高频误差的检测会造成有用信息的丢失,导致 PSD 曲线上某些空间频率处的幅值出现偏差,从而影响光学元件质量的判断,所以一般商用干涉仪主要关注低频面形误差。在高功率激光系统中,元件中频波面误差 PSD 幅值与近场光束均匀性以及远场焦斑质量关系密切,是需要严格控制的质量参数。利用仪器传递函数(ITF)曲线可以对实测 PSD 分布进行修正,但不同干涉仪的 ITF 存在差异,因此如何获得相对真实的 PSD 分布是中频波面误差检测主要关注的问题。本文利用美国 4D AccuFiz、ZYGO DynaFiz 以及 ZYGO GPI 三台商用斐索型干涉仪,分别检测周期性波纹和划痕样品,并计算波面 PSD 分布,以此探究不同干涉仪在各频率区间的响应规律。利用 ITF 曲线对 PSD 测量值进行修正,为真实评估光学元件的中频波面误差提供参考。

## 2 理论基础

### 2.1 PSD 定义及数值计算

定义二维波面相位畸变为  $z(x, y)$ ,离散化形式为  $z(m, n)$ ,其中  $m=0, 1, \dots, M-1, n=0, 1, \dots, N-1$ ,  $M, N$  分别为  $x, y$  方向上的采样点数;采样间隔分别为  $\Delta x, \Delta y$ ,则采样面积为  $A=M\Delta x \cdot N\Delta y$ 。利用快速傅里叶变换(FFT)算法进行数值分析,离散波面相位畸变的傅里叶变换可表示为

$$Z(u, v) = \Delta x \Delta y Z^*(u, v), \quad (1)$$

式中  $u, v$  为频域自变量,且  $-M/2 < u \leq M/2, -N/2 < v \leq N/2$ 。FFT 算法计算结果

$$Z^*(u, v) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} z(m, n) \exp\left[-i2\pi\left(\frac{mu}{M} + \frac{nv}{N}\right)\right]. \quad (2)$$

为了使 PSD 具有正确的大小和量纲,添加系数  $\Delta x$  和  $\Delta y$ <sup>[10]</sup>。二维(2D)离散 PSD 可定义为

$$S_{2D}(u, v) = \frac{|Z(u, v)|^2}{A} = \frac{\Delta x \Delta y}{MN} \left| \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} z(m, n) \exp\left[-i2\pi\left(\frac{mu}{M} + \frac{nv}{N}\right)\right] \right|^2, \quad (3)$$

PSD 曲线的空间频率  $f_x = u/(M\Delta x), f_y = v/(N\Delta y)$ 。

利用二维波面相位数据计算二维和一维(1D)PSD 函数涉及一系列复杂算法<sup>[11-12]</sup>,计算流程如图 1 所示。检测元件表面灰尘及电荷耦合器件(CCD)坏点造成的波前相位数据中的无效点,若简单地用 0 进行替换会引入高频噪声,利用双线性插值法对无效点进行填充,可有效解决这一问题。为了减小傅里叶变换过程中数据边缘截断效应引入的吉布斯噪声,对相位数据添加汉宁窗以实现数据边缘的平滑。

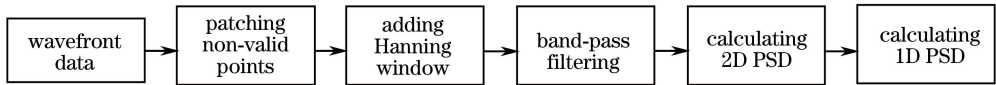


图 1 PSD 数值计算流程

Fig. 1 Flow chart of numerical calculation of PSD

利用二维波面数据计算一维平均 PSD 有两种方法: 1) 计算每一行(列)波面数据的一维 PSD,然后对所有一维 PSD 求平均值<sup>[10]</sup>; 2) 在任意方向上对二维 PSD 进行拉东变换以求取一维平均 PSD<sup>[13-14]</sup>。在利用方法 1) 计算一维平均 PSD 时,一维采样数据垂直方向上的分辨率不同,会引入额外误差<sup>[15]</sup>,因此采用方法 2) 计算一维 PSD。拉东变换是对二维 PSD 在任意角度上进行投影得到的一维 PSD 坍塌,即在投影角度上对二维离散 PSD 求和。当投影方向和水平空间频率轴之间的夹角  $\theta=0$  时,即可得到  $x$  方向一维 PSD,即

$$S_{1D}(u) = \sum_{v=0}^{N/2} S_{2D}(u, v) \frac{1}{L_y}, \quad (4)$$

式中  $S_{1D}$  和  $S_{2D}$  分别为一维 PSD 和二维 PSD,  $L_y$  为  $y$  方向上的采样长度,  $\Delta v$  为投影角度上的频率增量,即

$$\Delta v = \sqrt{\left(\frac{1}{L_x} \sin \theta\right)^2 + \left(\frac{1}{L_y} \cos \theta\right)^2}, \quad (5)$$

式中  $L_x$  为  $x$  方向上的采样长度。

### 2.2 干涉仪的空间频率响应与传递函数

设干涉仪检测波长为  $\lambda$ , 当检测表面高度变化远小于  $\lambda/4$  的相位物体时, 干涉仪系统可认为是线性系统, 具有低通滤波特性<sup>[9,16]</sup>, 其传递函数大小在低频域接近 1, 且随着空间频率的增大逐渐降低, 在奈奎斯特频率处截止。因此干涉仪在测量空间周期处于毫米及亚毫米级的中频波面畸变时, 会造成部分频率信息的丢失, 即实测 PSD 分布  $S_{\text{meas}}$  相对真实 PSD 分布  $S_{\text{ideal}}$  在不同空间频率处有不同的衰减。干涉仪的 ITF 与仪器本身的光学系统、CCD 阵列、信号处理以及软件算法等因素有关<sup>[17]</sup>, 在实际操作中分别计算各个部分对干涉仪 ITF 的影响比较困难, 通常利用相位已知的高精度台阶相位板, 用实验的方法对干涉仪进行标定, 通过比较  $S_{\text{meas}}$  与  $S_{\text{ideal}}$  的差异求取 ITF<sup>[18-19]</sup>。利用该方法得到的干涉仪的传递函数为

$$I_{\text{ITF}}(f) = \sqrt{\frac{S_{\text{meas}}(f)}{S_{\text{ideal}}(f)}}, \quad (6)$$

式中  $f$  为空间频率。真实 PSD 分布可由下式计算

$$S_{\text{ideal}}(f) = \frac{S_{\text{meas}}(f)}{[I_{\text{ITF}}(f)]^2}. \quad (7)$$

## 3 实验研究

### 3.1 检测仪器

为了对比不同干涉仪对 PSD 测量的影响, 分别采用 4D AccuFiz、ZYGO DynaFiz 以及 ZYGO GPI 三台斐索型干涉仪在静态模式下对实验样品进行检测。三台干涉仪的测试波长均为 632.8 nm。ZYGO DynaFiz 可以实现  $1.0\times, 1.7\times, 3.0\times$  三个固定倍率的变焦。三台干涉仪相关参数见表 1。图 2 所示为 4D AccuFiz 和 ZYGO DynaFiz 干涉仪的 ITF 曲线<sup>[16]</sup>, 其中 4D AccuFiz 干涉仪 ITF 曲线是利用 ZYGO 公司的直径  $\Phi$  为 100 mm 标准台阶阵列相位板在实验室实测环境中标定得到的。

表 1 干涉仪相关参数

Table 1 Related parameters of interferometers

| Measurement instrument           | $\Phi$ /mm | Number of CCD pixels | Sampling interval /mm |
|----------------------------------|------------|----------------------|-----------------------|
| 4D AccuFiz interferometer        | 100        | 2400×2400            | 0.043                 |
| ZYGO DynaFiz interferometer 1.0× | 100        | 1200×1200            | 0.092                 |
| ZYGO DynaFiz interferometer 1.7× | 58         | 1200×1200            | 0.054                 |
| ZYGO DynaFiz interferometer 3.0× | 33         | 1200×1200            | 0.031                 |
| ZYGO GPI interferometer          | 100        | 640×480              | 0.237                 |

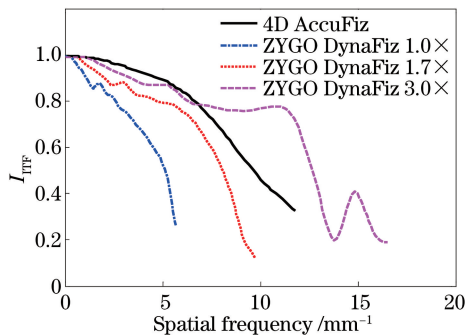


图 2 4D AccuFiz 和 ZYGO DynaFiz 干涉仪 ITF 曲线

Fig. 2 ITF curves of 4D AccuFiz and ZYGO DynaFiz interferometers

### 3.2 波纹样品波面 PSD 检测

为了模拟光学元件表面中频波面误差, 利用磁流变抛光技术分别在 4 块 30 mm×30 mm 的熔石英光学元件样品表面磨削出等间隔条纹, 设定加工的条纹截面为余弦形, 空间周期  $T$  分别为 1, 2, 3, 4 mm, 选用的 4 块样品基片峰谷值在  $0.25\lambda \sim 0.35\lambda$  之间, 均方根值约为  $0.04\lambda$ 。图 3 所示为 4D AccuFiz 干涉仪测得的 4 块样品波面相位图, 图 4 所示为滤波后(滤波范围为中频段, 即  $0.03 \text{ mm}^{-1} \leq f \leq 8.3 \text{ mm}^{-1}$ ) 4 块样品的波面

相位一维轮廓曲线。从图 3、4 可以看出,实际加工出的样品并非理想余弦条纹,在空间周期分别为 2,3,4 mm 的主峰顶端,存在更小空间周期的调制,且随着空间周期的增大,调制峰增多。对滤波后波面条纹深度取平均,结果分别为 2,5,4,4 nm。

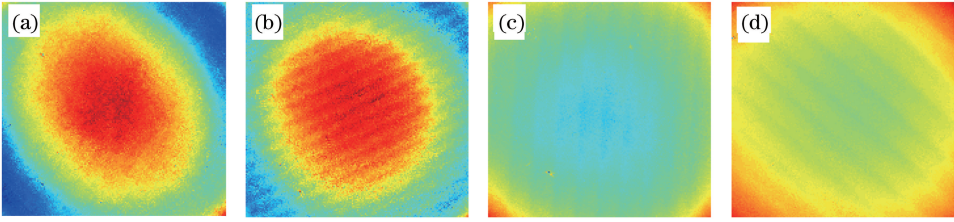


图 3 不同空间周期波纹样品波面相位。(a)  $T=1$  mm; (b)  $T=2$  mm; (c)  $T=3$  mm; (d)  $T=4$  mm  
Fig. 3 Wavefront phases of ripple samples with different spatial periods. (a)  $T=1$  mm; (b)  $T=2$  mm;  
(c)  $T=3$  mm; (d)  $T=4$  mm

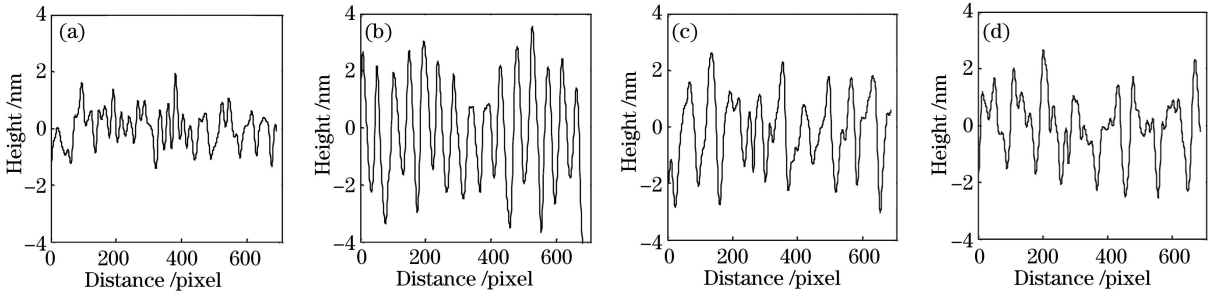


图 4 不同空间周期波纹样品一维轮廓曲线。(a)  $T=1$  mm; (b)  $T=2$  mm; (c)  $T=3$  mm; (d)  $T=4$  mm  
Fig. 4 1D profile curves of ripple samples with different spatial periods. (a)  $T=1$  mm; (b)  $T=2$  mm; (c)  $T=3$  mm;  
(d)  $T=4$  mm

分别利用 4D AccuFiz、ZYGO DynaFiz 1.0 $\times$ 以及 ZYGO GPI 三台干涉仪对 4 块波纹样品进行检测。利用(3)~(5)式计算测试样品的波面一维平均 PSD,三台干涉仪测量结果如图 5 所示。由于加工误差,4 块波纹样品对应的实际特征频率分别为 0.96,0.48,0.33,0.25  $\text{mm}^{-1}$ 。图 4 中条纹主峰顶端的调制峰在 PSD 曲线上表现为更高频率的旁峰。对比不同干涉仪检测结果可以看出,在中低频范围内,如空间频率为 0.48,

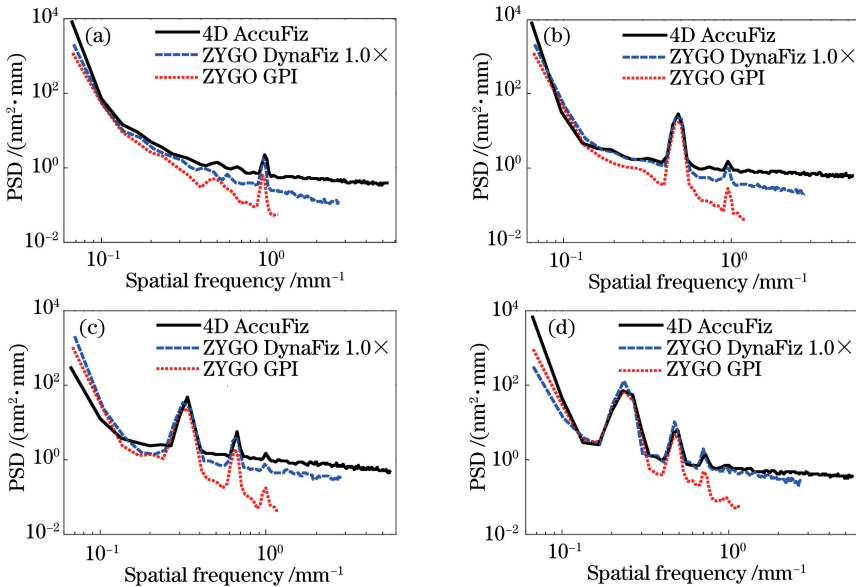


图 5 不同空间周期波纹样品波面一维 PSD 分布。(a)  $T=1$  mm; (b)  $T=2$  mm; (c)  $T=3$  mm; (d)  $T=4$  mm  
Fig. 5 1D PSD distributions of wavefronts of ripple samples with different spatial periods. (a)  $T=1$  mm; (b)  $T=2$  mm;  
(c)  $T=3$  mm; (d)  $T=4$  mm



0.33, 0.25 mm<sup>-1</sup>处, 三台干涉仪测得的 PSD 峰值相差不大; 随着空间频率的增大, 三台干涉仪响应度差异逐渐变大, 具有最高 CCD 分辨率的 4D AccuFiz 在高频范围内响应度最高, ZYGO DynaFiz 1.0×次之, ZYGO GPI 高频响应度最低。

### 3.3 划痕样品波面 PSD 检测

为了进一步探究不同干涉仪在高频域响应的区别, 利用光刻技术在平整度的玻璃基板上刻蚀出两组周期性长条形凹槽, 利用这些周期性的长条形凹槽来模拟周期性划痕中高频误差。玻璃基板表面峰谷值约为 0.15λ, 均方根值约为 0.01λ, 刻蚀区域大小为 10 mm×4 mm。第一组划痕和基板边缘呈 45°夹角, 为倾斜划痕, 其中深划痕周期约为 0.3 mm, 深度平均为 20 nm, 在深划痕之间刻蚀一系列浅划痕, 周期约为 0.1 mm, 深度约为 10 nm; 第二组划痕垂直于基板边缘, 为垂直划痕, 其中深划痕周期约为 0.4 mm, 深度约为 35 nm, 浅划痕的周期、深度与倾斜浅划痕一致。利用 ZYGO DynaFiz 干涉仪在 3 倍变焦下进行测量, 得到两组划痕样品波面相位图如图 6(a)、(b)所示, 得到的垂直划痕样品一维轮廓曲线如图 6(c)所示。

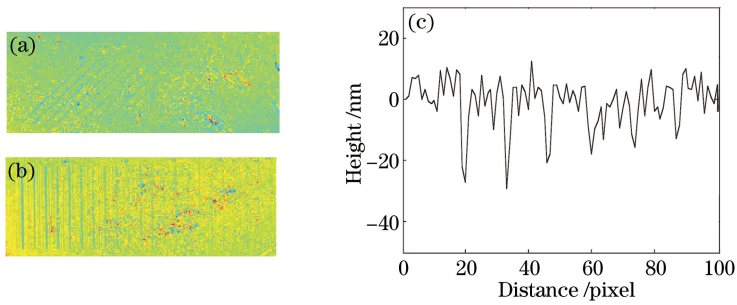


图 6 周期性划痕。(a) 倾斜划痕波面相位图; (b) 垂直划痕波面相位图; (c) 垂直划痕样品一维轮廓曲线  
Fig. 6 Periodic scratches. (a) Wavefront phase image of inclined scratches; (b) wavefront phase image of vertical scratches; (c) 1D profile curve of sample with vertical scratches

利用 4D AccuFiz 和 ZYGO DynaFiz 干涉仪测量划痕样品, 其中 ZYGO DynaFiz 干涉仪分别在 1.0×、1.7×、3.0× 三个固定倍率的变焦下进行测量。4D AccuFiz 和 ZYGO DynaFiz 两台干涉仪测得的一维 PSD 分布分别如图 7、8 所示。对于 ZYGO DynaFiz 干涉仪, 随着变焦倍率的增大, PSD 曲线上的峰值也随之增大, 且频域越高, 峰值相差越大。空间频率小于 10 mm<sup>-1</sup>时, 4D AccuFiz 与 ZYGO DynaFiz 3.0×干涉仪的 PSD 曲线峰值比较接近; 空间频率大于 10 mm<sup>-1</sup>时, 4D AccuFiz 检测结果与 ZYGO DynaFiz 3.0×检测结果差异较大。

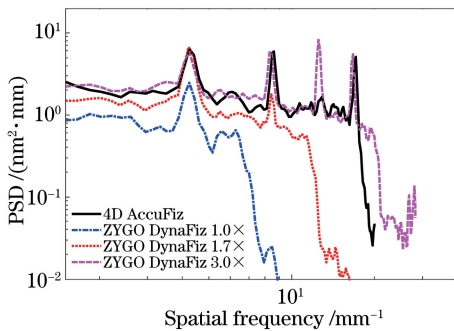


图 7 倾斜划痕样品一维 PSD 曲线

Fig. 7 1D PSD curves of samples with inclined scratches

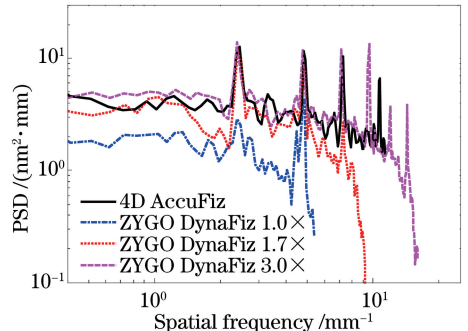


图 8 垂直划痕样品一维 PSD 曲线

Fig. 8 1D PSD curves of samples with vertical scratches

## 4 分析与讨论

### 4.1 不同干涉仪对中频误差 PSD 的响应

从样品波面 PSD 实测结果可以看出, 三台干涉仪对 PSD 的响应存在差异, 尤其是在高频域, 空间频率越大, 响应差异越大。为了更直观地进行对比, 4D AccuFiz 干涉仪的 ITF 曲线是在实际检测环境中标定得

到的,具有较高的可信度。分别利用 ZYGO DynaFiz 和 ZYGO GPI 干涉仪测得的 PSD 曲线各尖峰峰值,与 4D AccuFiz 干涉仪测得的 PSD 曲线相应尖峰峰值作比值,结果如图 9 所示。从图中可以看出,相对于 4D AccuFiz 干涉仪,ZYGO DynaFiz 3.0×干涉仪在各频段的响应规律和图 2 中 ITF 的变化趋势一致。4D AccuFiz 和 ZYGO DynaFiz 3.0×干涉仪在中低频段响应度相差不大,但在高频段后者具有更高的响应度,可见干涉仪分辨率越高,PSD 响应度越高。ZYGO GPI 和 ZYGO DynaFiz 1.0×干涉仪的响应度随着空间频率的增大迅速降低,二者对中高频波面误差检测的失真较大,需要对测量值进行修正。

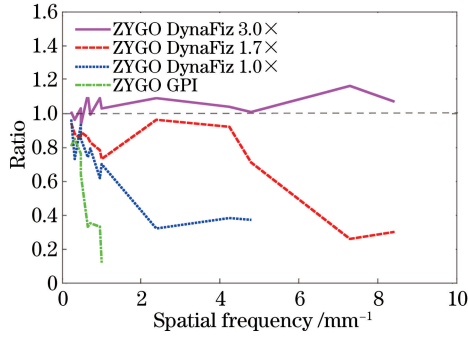


图 9 三台干涉仪响应度对比

Fig. 9 Responsivity comparison among three interferometers

#### 4.2 利用 ITF 评估被测光学元件真实 PSD 分布

根据(7)式,利用图 2 中 4D AccuFiz 和 ZYGO DynaFiz 干涉仪的 ITF 曲线,对垂直划痕样品 PSD 测量值进行修正,计算结果如图 10 所示。

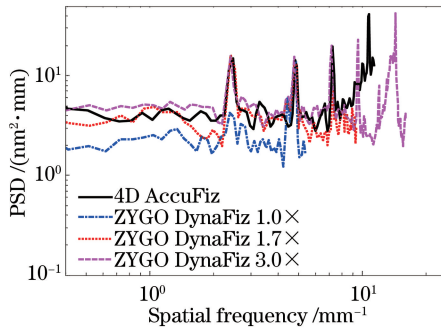


图 10 垂直划痕样品 PSD 修正曲线

Fig. 10 Corrected PSD curves of samples with vertical scratches

理论上,ITF 曲线修正后的 PSD 为真实值,不同仪器修正值应保持一致。将图 10 和图 8 进行对比,修正后的 4 条 PSD 曲线在高频域有所抬高,曲线整体趋势接近一致,即高频信息得到了有效恢复。对于图 10 中前三个尖峰幅值,4D AccuFiz 和 ZYGO DynaFiz 干涉仪的结果几乎一致,真实反映了中频波面误差,可见修正后的 PSD 分布的准确性得到了较大幅度的提高。因此,利用干涉仪(尤其是对中高频信息响应能力比较弱的低分辨率干涉仪)检测元件中频波面误差时,为了得到相对真实的中频波面误差,需要利用 ITF 曲线对 PSD 分布进行修正。

图 10 中 ZYGO DynaFiz 1.0×干涉仪对应的 PSD 修正曲线第一个尖峰仍然较低,可能是检测时引入了干扰因素,或者在该空间频段内干涉仪的 ITF 曲线偏高,即使利用 ITF 曲线进行修正,依然无法得到比较真实的 PSD 曲线幅值。当空间频率大于  $10 \text{ mm}^{-1}$  且接近截止频率时,4D AccuFiz 和 ZYGO DynaFiz 3.0×干涉仪对应的 PSD 修正值也不可信。干涉仪 ITF 的标定是在较理想的条件下进行的,而实际检测中,受干涉仪自身及其他各种因素的影响,某些空间频率处的响应同标定的 ITF 存在差异,所以简单利用商家给出的 ITF 曲线对 PSD 测量值进行修正依然存在一些问题。为了得到更加真实的 PSD 分布,需要在测量条件下对干涉仪进行标定。此外,在相同测量条件下,也可以利用高分辨率仪器对低分辨率仪器的测量值进行修正。

### 4.3 测量误差及影响因素分析

利用干涉仪检测光学元件波面误差 PSD 分布,结果的真实性除了受干涉仪自身低通滤波特性的影响,还受很多其他因素的影响,其中光学元件倾斜及不恰当的装夹方式会产生低频误差,自身条纹会引入高频调制<sup>[20]</sup>,干涉仪成像面是否精准会影响高频处的响应<sup>[18,21]</sup>。为了得到相对真实的 PSD 分布,实际检测中要尽量减小这些因素的影响。

## 5 结 论

干涉仪的低通滤波特性会造成部分波面 PSD 频率分量的丢失,影响中频波面误差的评估。分别利用 4D AccuFiz、ZYGO DynaFiz 以及 ZYGO GPI 三台干涉仪检测周期性波纹和划痕样品,探究干涉仪空间响应对 PSD 测量的影响。对实测波面 PSD 曲线进行比较,发现干涉仪分辨率越高,其对中高频信息的响应度就越高。干涉仪在各个频率区间的响应度整体上和标定的 ITF 曲线一致,依据标定的 ITF 曲线对 PSD 实测值进行修正,一定程度上可提高数据的真实性。研究结果揭示了干涉仪空间响应规律,有助于在实际检测中获得相对真实的 PSD 分布,为高功率激光元件中频波面误差的评估提供了依据。然而,在某些频率范围内,单次标定的 ITF 曲线和干涉仪实际响应并不相符,因此如何在实际检测环境中对干涉仪进行更加准确的标定,以及如何在工程应用中提高 PSD 分布修正的实时性和有效性,需要进一步的理论和实验研究。

## 参 考 文 献

- 1 Wang D Y, English R E, Jr, Aikens D M. Implementation of ISO 10110 optics drawing standards for the National Ignition Facility[C]. SPIE, 1999, 3782: 502-508.
- 2 Lawson J K, Wolfe C R, Manes K R, *et al.* Specification of optical components using the power spectral density function [C]. SPIE, 1995, 2536: 38-50.
- 3 Spaeth M L, Manes K R, Widmayer C C, *et al.* National Ignition Facility wavefront requirements and optical architecture [J]. Optical Engineering, 2004, 43(12): 2854-2865.
- 4 Liu Hongjie, Jing Feng, Zuo Yanlei, *et al.* Relation between wavefront power spectral density and wings of focal spot[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(4): 504-508.  
刘红婕, 景 峰, 左言磊, 等. 激光波前功率谱密度与焦斑旁瓣的关系[J]. 中国激光, 2006, 33(4): 504-508.
- 5 Zhu Ping, Xie Xinglong, Jiao Zhaoyang, *et al.* Influence of wave-front error on temporal signal-to-noise ratio in large aperture ultrashort pulse focusing system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1032001.  
朱 坪, 谢兴龙, 焦兆阳, 等. 大口径超短脉冲聚焦系统波前误差对时间信噪比的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1032001.
- 6 Aikens D M, Wolfe C R, Lawson J K. The use of Power Spectral Density (PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility[C]. SPIE, 1995, 2576: 281-292.
- 7 Shen Weixing, Xu Deyan. Power spectral density function estimate in high power laser optical element surface[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(4): 392-396.  
沈卫星, 徐德行. 强激光光学元件表面功率谱密度函数估计[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(4): 392-396.
- 8 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.
- 9 de Groot P, de Lega X C. Interpreting interferometric height measurements using the instrument transfer function[M]// Osten W. Fringe 2005. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 30-37.
- 10 Elson J M, Bennett J M. Calculation of the power spectral density from surface profile data[J]. Applied Optics, 1995, 34(1): 201-208.
- 11 Youngworth R N, Gallagher B B, Stamper B L. An overview of power spectral density (PSD) calculations[C]. SPIE, 2005, 5869: 58690U.
- 12 Williams W H. NIF large optics metrology software: description and algorithms[R]. United States: Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), 2002.
- 13 Galigekere R R, Holdsworth D W, Swamy M N S, *et al.* Moment patterns in the radon space[J]. Optical Engineering, 2000, 39(4): 1088-1097.

- 14 Cheng Xiaofeng, Zheng Wanguo, Jiang Xiaodong, *et al.* Evaluating intermediate frequency error property of wavefront of optical components with PSD collapse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(10): 1465-1468.  
程晓锋, 郑万国, 蒋晓东, 等. 用功率谱密度坍塌评价光学元件波前中频误差特性[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(10): 1465-1468.
- 15 Takacs P Z, Barber S, Church E L, *et al.* 2D spatial frequency considerations in comparing 1D power spectral density measurements[R]. United States: Brookhaven National Laboratory (BNL), 2010: OWE5.
- 16 Sykora D M, de Groot P. Instantaneous measurement Fizeau interferometer with high spatial resolution[C]. SPIE, 2011, 8126: 812610.
- 17 Church E L, Vorburger T V, Wyant J C. Direct comparison of mechanical and optical measurements of the finish of precision machined optical surfaces[J]. *Optical Engineering*, 1985, 24(3): 243388.
- 18 Takacs P Z, Li M X, Furenliid K, *et al.* A step-height standard for surface-profiler calibration[C]. SPIE, 1993, 1995: 65-74.
- 19 Wolfe C R, Downie J D, Lawson J K. Measuring the spatial frequency transfer function of phase-measuring interferometers for laser optics[C]. SPIE, 1996, 2870: 553-557.
- 20 Zhang Rongzhu, Xu Qiao, Gu Yuanyuan, *et al.* Testing errors and its influence of the large aperture optical elements[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(2): 133-136.  
张蓉竹, 许 乔, 顾元元, 等. 大口径光学元件检测中的主要误差及其影响[J]. *强激光与粒子束*, 2001, 13(2): 133-136.
- 21 Novak E, Ai C, Wyant J C. Transfer function characterization of laser Fizeau interferometer for high-spatial-frequency phase measurements[C]. SPIE, 1997, 3134: 114-121.