

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0254-03

大口径光学元件波前调制 PSD 初步模拟分析*

张蓉竹^{1,2} 蔡邦维¹ 杨春林² 许 乔²

(¹ 四川大学光电系, 成都 610064
² 成都精密光学工程研究中心, 成都 610041)

摘要 使用 PSD 作为大口径光学元件表面加工质量的评价参数, 针对不同的波前调制进行了初步的模拟计算。得到了不同调制频率和不同调制深度情况下的 PSD 曲线变化情况, 结果表明了 PSD 曲线能够在频率域对不同调制频率信息和不同调制深度信息都具有很好的描述功能。

关键词 波前调制, PSD 曲线, 调制频率, 调制深度

中图分类号 TN76 **文献标识码** A

The Preparatory Analysis on the Modulation of the Large Aperture Optical Elements

ZHANG Rong-zhu^{1,2} CAI Bang-wei¹ YANG Chun-lin² XU Qiao²

(¹ Photo-Electronic Department of Sichuan University, Chengdu 610064
² Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041)

Abstract The power spectral density (PSD) is employed as a parameter to specify the large aperture optical elements' surface manufacture quality. According to the different kinds of modulation of the wavefront, the PSD calculation results have been given. The variation of the PSD curves with different depth and frequency of the modulation has been shown. The results show that the PSD curve can describe the modulation information of the optical elements surface clearly.

Key words modulation of the wavefront, PSD curve, modulation depth, modulation frequency

1 引 言

目前高精度的光学元件波前检测技术已成为高功率固体激光工程中不可忽视的重要组成部分, 因为大口径光学元件的加工质量直接关系到强激光系统运行的安全性和效率。在诸如 ICF 驱动器那样的高功率激光系统中, 由于自聚焦所造成的对光学元件的直接破坏是极大的, 而导致自聚焦产生的原因主要是发生了畸变的波前在通过光学元件时发生了非线性作用。光学系统中, 波前畸变又主要是由于光学元件表面对激光波前进行了调制造成的。为了进一步的认识波前调制对激光系统的影响, 本文使用 PSD 作为评价工具, 对波前畸变进行了数值模拟, 分别研究了不同频率下的 PSD 曲线变化, 以及不同调制深度下的 PSD 曲线变化。

2 波前模拟及 PSD 计算

针对当前 ICF 驱动系统所使用的平面波前, 我们主要讨论平面波前的畸变情况。首先用 30 阶超高斯光束波前近似模拟平面光波, 模拟使用的公式如下

$$\phi(x) = 200 \exp \left[-\pi \left(\frac{x}{10} \right)^{30} \right] \quad (1)$$

由此得到一个相位高度为 200 nm, 光斑口径为 20 mm 的近平面波波前分布。为了与实际检测过程中使用的干涉仪参数相对应, 同时也为了对实际检测中的计算过程相符合, 我们模拟的光波前具有与通过 CCD 检测得到的离散数据相同的参数, 即采样间距 0.5 mm。

理想情况下, 没有经过光学元件的初始波前是一个平面。一旦光波通过了光学元件, 由于元件表面不可能完全光滑而导致的散射、漫反射等作用, 波前相位分布发生变形, 这可以看作光学元件对波前

* 惯性约束聚变青年基金(青 2000-6)资助课题。

产生调制引起的。为了简化分析过程,本文主要使用规则的正弦调制来模拟实际情况下的随机相位调制。具体计算使用的方法是在所模拟的平面光波中加入一个正弦相位调制量,用公式表示调制后的光波波前如下

$$\phi(x) = 200 \exp \left\{ -\pi \left(\frac{x}{10} \right)^{30} \exp[\sin(i\pi x)M] \right\} \quad (2)$$

式中 $i\pi$ 表示了不同的调制频率, M 则是调制深度。

(3) 式则是 PSD 的计算公式

$$\text{PSD}(f) = \frac{\Delta x}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} \phi(x) \exp(-2\pi i n f \Delta x) \right|^2 \quad (3)$$

式中 f 是空间频率, N 、 Δx 分别是 CCD 的采样点数和采样间距, $\phi(x)$ 是光波前的相位分布函数。

光波通过光学元件后其波前受到的调制主要受到调制频率和调制深度的影响,下文将对这两方面分别进行讨论。

3 不同调制频率的 PSD 曲线

作为有效的光学元件检测评价参数,PSD 与通常使用的 P - V 、 RMS 等相比,其最大优点就在于能直接反映出不同空间频率调制对波前的影响情况。本文模拟了不同的波前畸变情况,调制的频率从 π 到 6π 之间不定间隔变换,在频率变换的同时固定调制深度为 $1/100$ (nm)。以下是具有代表性的结果。

图 1 是相位受已调制的平面光波前示意图,图 1 中所表示的是调制深度为 $1/100$ (nm)、调制频率为 2π 的畸变光波前。分别将这些不同畸变情况的相位值代入(3)式中进行计算,得到图 2、图 3 所示 PSD 曲线。

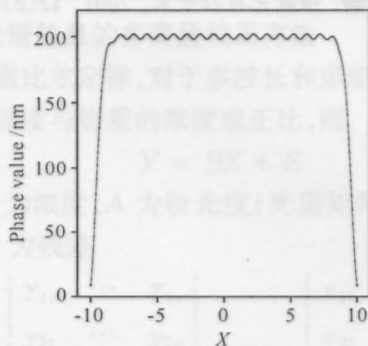


图 1 调制频率为 2π , 深度为 $(1/100)$ nm 的波前相位分布
Fig. 1 Phase distribution with 2π modulation frequency and $(1/100)$ nm modulation depth

一旦波前相位分布发生畸变,其 PSD 值会相应发生变化,具体表现在曲线上出现了突出的峰值。而且,随着调制频率的增加,峰值出现的频率位置也

相应增加,即对波前不同的频率调制会在 PSD 曲线的不同频率区域导致 PSD 值的突变。只要通过数值分析得到 PSD 值的突变位置,即可知道光波波前所受到的调制频率高低,相应得知被检测的光学元件的加工情况。

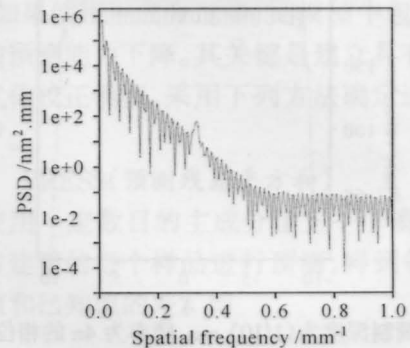


图 2 调制频率为 2π 的波前 PSD 分析结果
Fig. 2 PSD curve of the phase distribution with 2π modulation frequency

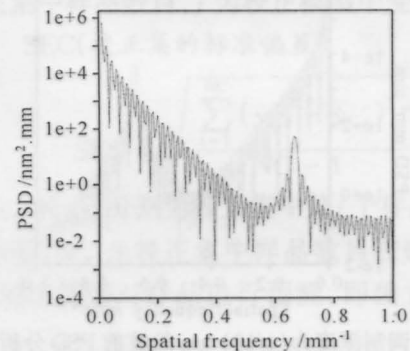


图 3 调制频率为 4π 的波前 PSD 分析结果
Fig. 3 PSD curve of the phase distribution with 4π modulation frequency

4 不同调制深度的 PSD 曲线

同调制频率一样,调制深度也是影响波前畸变的重要因素之一。通过对平面相位分布进行不同调制深度的模拟变换,可以了解到相同调制频率下不同调制强度的 PSD 分析结果。实际运算中,我们将正弦调制的频率固定为 4π ,使调制深度从 $1/10$ (nm)到 $1/2000$ (nm)之间作不等间距变化,得到以下典型结果。

图 4 是调制深度 $1/10$ (nm),频率 4π 的相位分布示意图。图 5、图 6 是在相同调制频率下得到的调制深度分别为 $1/10$ (nm), $1/100$ (nm) 的波前 PSD 分析结果。首先,由图可见,由于调制频率没有改变,PSD 值的突变位置没有发生变化,但突变的峰值大小发生了变化。其次,从图 5、图 6 可见,调制深度降低,所对应得到的 PSD 分析结果中 PSD

突变值降低,也就是说调制深度对 PSD 分析的影响是集中在强度变化上的,通过分析得到的 PSD 突变值的大小,也可以了解到相应被检测光学元件的表面质量情况。

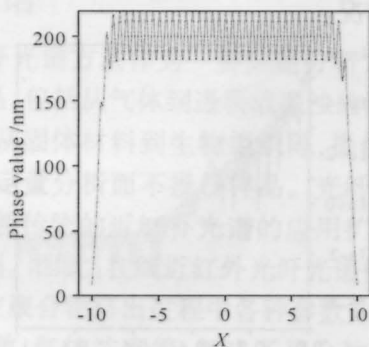


图 4 调制深度为(1/10) nm,频率为 4π 的相位分布
Fig. 4 Phase distribution with 4π modulation frequency and (1/10) nm modulation depth

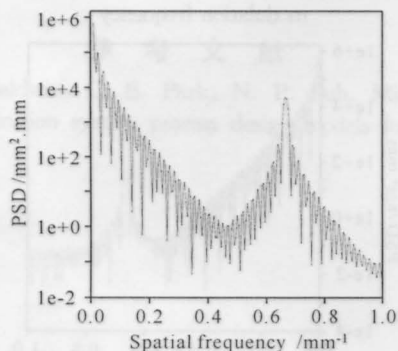


图 5 调制深度为(1/10) nm 的波前 PSD 分析结果
Fig. 5 PSD curve of the phase distribution with 2π modulation frequency

5 结 论

通过对引起平面波前相位畸变的波前调制模拟

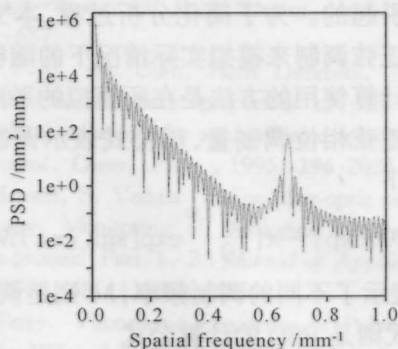


图 6 调制深度为(1/100) nm 的波前 PSD 分析结果
Fig. 6 PSD curve of the phase distribution with 2π modulation frequency

分析,分别从调制频率和调制深度两个方面进行了模拟运算,了解到只要引入了调制,平面光波波前发生了畸变,则作为波前检测评价参数的 PSD 值就会发生突变。随着相位调制频率的增加,在曲线上对应 PSD 突变值发生的位置就会向高频方向移动;随着相位调制深度的增加,PSD 突变值的大小也会随之变大。由此可以通过对被检测光学元件的相位数据进行 PSD 分析,从 PSD 突变值出现的具体位置、大小可对该元件表面质量有进一步了解。

参 考 文 献

- 1 D. M. Aikens, C. R. Wolfe, J. K. Lawson. The use of Power Spectral Density (PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility. *Proc. SPIE*, 1995, **2576**:281~292
- 2 J. K. Lawson, C. R. Wolfe, K. R. Manes *et al.*. Specification of optical components using the power spectral density function. *Proc. SPIE*, 1995, **2536**:38~50
- 3 张蓉竹,许 乔,顾元元等. 光学元件检测中的主要误差及其影响. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(2):133~136

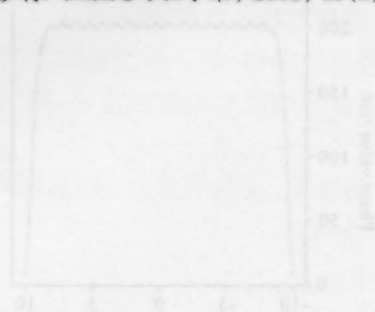


图 7 调制深度为(1/100) nm 的波前 PSD 分析结果
Fig. 7 PSD curve of the phase distribution with 2π modulation frequency and (1/100) nm modulation depth