

文章编号: 0253-2239(2001)03-0344-04

# 大口径光学元件波前功率谱密度检测\*

许 乔 顾元元 柴 林 李 伟

(成都精密光学工程研究中心, 成都 610041)

**摘要:** 波前功率谱密度(PSD)被用于评价惯性约束聚变激光驱动器光学元件在中频区域的波前误差。高功率固体激光装置对大口径光学元件波前质量的要求有别于传统光学系统,要求对波前误差进行较高空间频率的测量。探讨了大口径光学元件波前的高空间分辨率检测技术,采用大口径相移干涉仪作为波前检测仪器,通过傅里叶变换获得波前一维功率谱密度分布。对惯性约束聚变激光驱动器的典型光学元件进行了波前功率谱密度的检测和分析。

**关键词:** 光学元件评价; 光学检测; 波前功率谱密度  
中图分类号: TH74 文献标识码: A

## 1 引 言

用于惯性约束聚变(ICF)的高功率固体激光装置大多采用多路大口径结构<sup>[1]</sup>,这种光学系统不仅具备传统精密成像光学系统的高像质特性,而且还是高功率密度激光能量的传输载体,具有通光口径大、光学性能好、承载激光束功率高的特点。多路光学系统将使用大量的精密光学元件,高面形精度、超光滑表面、高损伤阈值以及大口径构成了对光学元件的综合要求。有别于传统的成像光学系统,惯性约束聚变激光系统要求对光学元件的波前质量进行全空间频段的控制,因为元件低频的波前畸变误差将直接决定激光束的焦斑分布<sup>[2]</sup>;中、高频的波前畸变误差作为光束强度和相位扰动的噪声源,不但造成焦斑旁瓣,也是造成非线性自聚焦破坏的主要根源之一<sup>[3]</sup>。波前功率谱密度(PSD)指标主要用于评价光学元件中频段的光学质量<sup>[4]</sup>,是需要严格控制的质量参数。

## 2 波前功率谱密度

波前功率谱密度是波前各频率分量傅里叶频谱振幅的平方,其一维的定义形式为

$$J_{\text{PSD}}(\nu_i) = [A(\nu_i)]^2 / \Delta\nu, \quad (1)$$

式中  $\nu_i$  为空间频率,  $\Delta\nu$  为频率间隔,  $A(\nu_i)$  为波前

畸变  $W(x)$  的傅里叶振幅,即:

$$A(\nu) = \int_0^L W(x) \exp(-i\nu x) dx, \quad (2)$$

其中  $W(x)$  为一维方向的波前畸变相位值,  $L$  为采样长度。从(1)、(2)式可知,一维波前功率谱密度的量纲为长度单位的三次方。

在惯性约束聚变激光驱动器中,波前功率谱密度主要用于评价光学元件中频段的误差,包括元件制造过程中引入的残余误差和材料的非均匀性误差。美国国家点火装置对中频段的定义为空间波长在 33 ~ 0.12 mm 之间的区域,其评价指标为<sup>[4]</sup>:

$$J_{\text{PSD}}(\nu) \leq A\nu^b, \quad (3)$$

式中,  $A = 1.05$ ,  $b = 1.55$ 。按照小尺度自聚焦的线性扰动不稳定性理论,光学元件的内部结构缺陷或加工误差缺陷将形成对光场振幅和相位的微小扰动,经过传输后,由于非线性增长,振幅和相位的扰动都将形成对光强的调制,不同空间频率的误差其增益是不同的,此评价指标即反映了系统运行功率水平对不同空间频率加工误差的要求。判断光学元件中段频加工质量的好坏,就是将元件实测的波前功率谱密度曲线同此标准曲线相比。我国的惯性约束聚变激光器也有类似的要求。

波前功率谱密度是一种描述波前信息的新方法,而不是新的物理量。传统光学系统广泛采用波前峰谷值、均方根值(RMS)或泽尼克(Zernicke)多项式来评价光学质量,这些指标较难提供丰富的波前误差信息,特别是空间波长在毫米量级的中频误差信息,以用于评价在强光效应下光学元件对系统光

\* 本文得到中国工程物理研究院科学技术基金及惯性约束聚变青年科学基金的资助。

收稿日期: 1999-08-18; 收到修改稿日期: 1999-11-22

束的调制影响。对光束的调制影响在中频区域显得尤为突出, 因为在此频段的误差很难通过系统优化设计而加以校正。由于这种调制影响是依赖于扰动的空间周期的, 因此必须控制每个元件的误差频谱分布, 传统的评价指标缺乏定量化的频谱描述功能。采用波前功率谱密度描述方法, 通过傅里叶变换, 可以定量地给出光学元件波前误差的空间频率分布, 从而确定各个频率分量的影响。

另一方面, 从傅里叶变换的实质, 可以将波前功率谱密度同其他物理评价指标联系起来。根据 Parseval 定理, 波前误差的均方根值与波前功率谱密度的关系为:

$$T_{\text{RMS}} = \Delta v \sum_{\nu} J_{\text{PSD}}(\nu). \quad (4)$$

波前误差的均方根值直接对应焦点的强度分布, 因此, 波前功率谱密度实际上以波前散射角的形式描述了散射光的强度和方向。

### 3 波前功率谱密度的检测技术

波前功率谱密度的检测, 实质上是对光学元件透射或反射波前畸变进行检测。在实验中, 使用 WYKO 24" 相移数字干涉仪作为检测仪器, 其结构形式为斐索(Fizeau)干涉, 如图 1 所示。此仪器的基本指标为: 检测激光波长 633 nm; 6: 1 连续变焦; 检测孔径 610 mm, 全孔径相移检测; 标准参考面面形误差  $\lambda/13$ (峰 - 谷值); CCD 像元规模: 368(H)  $\times$  240 (V)。

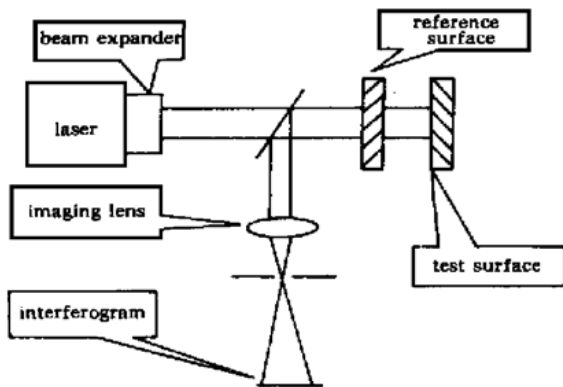


Fig. 1 Schematic diagram of Fizeau interferometer

检测过程中, 通过大口径相移检测获得高精度的元件波前误差  $W(x, y)$ 。沿水平向( $x$ ) 和垂直向( $y$ ), 分别对波前误差数据进行傅里叶变换, 即可得到  $x$  向或  $y$  向一维的波前功率谱密度:

$$J_{\text{PSD}}(\nu) = \frac{L}{N} \left| \sum_{j=1}^N W_j \exp[-i2\pi\nu(j-1)L] \right|^2, \quad (5)$$

式中  $W_j$  为沿  $x$  (或  $y$ ) 方向某一扫描线的波前振幅数据,  $N$  为采样数据点数目。为消除波前随机误差的影响, 在实际计算中, 可以考虑采样长度远大于波前起伏的尺度的近似, 然后对多条采样波前功率谱密度值进行平均。下面的实验中波前功率谱密度数据都是沿水平方向平均后的结果。

目前, 对中频段的定义主要是指空间波长在毫米量级到几十个毫米量级的范围。干涉仪作为低通滤波的光学仪器, 其空间频率带宽决定了测量的空间频带。在实验中, 测量的低频限由测试的孔径大小决定; 高频限取决于测试孔径大小和 CCD 像素的阵列规模, 一般取系统 Nyquist 频率的 3 倍。

### 4 检测结果

在用作惯性约束聚变驱动器的固体激光装置中, 主要使用了 5 类大口径光学元件: 磷酸盐钕玻璃放大片、K<sub>9</sub> (或熔石英) 平面光学元件、透镜、KDP (KD\*P) 晶体和偏振片。从光学冷加工类型上可分为平面、球面(非球面)加工, 但加工各种元件所采用的工艺方法并不相同; 而中频波前误差主要是在光学冷加工过程中引入的, 与加工方法有较大关系。

我们用前述方法, 利用 WYKO 24" 干涉仪对几种典型光学元件的波前功率谱密度进行了测量。图 2 是  $\phi 600$  mm 反射平面的干涉检测和波前功率谱密度计算结果, 采用分离器加工。图 3 是 200 mm  $\times$  400 mm 磷酸盐钕玻璃透射波前检测结果, 采用分离器加工。图 4 是  $\phi 330$  mm 反射平面检测结果, 采用数控小工具加工技术加工。图 5 是  $\phi 210$  mm 非球面聚焦透镜的透射波前的检测结果, 采用传统小工具修磨、抛光。图 6 是 150 mm  $\times$  150 mm KDP 晶体平面元件的透射波前检测结果, 采用单点金刚石刀具“飞切”加工。各图(b)中的虚线表示美国国家点火装置对大口径光学元件的波前功率谱密度要求, 也即(3)式的要求。

**讨论** 本工作尝试用大口径相移干涉仪对光学元件进行波前功率谱密度检测, 获得了我国惯性约束聚变光学元件较高空间频率的波前数据: 对 100 mm 的测试孔径, 测量高频限为 1 l/mm; 对 300 mm 的测试孔径, 高频限为 0.3 l/mm。测量结果表明光学元件波前功率谱密度的分布与元件的制造工艺有密切的关系, 例如金刚石车削和小工具抛光加工引入的波纹较多, 这对强光光学元件制造工艺的选型有指导意义。目前, 我们正在对强光光学元件波前功率谱

密度进行测量、统计,以进一步明确国内现有工艺技术方法的加工误差特点。

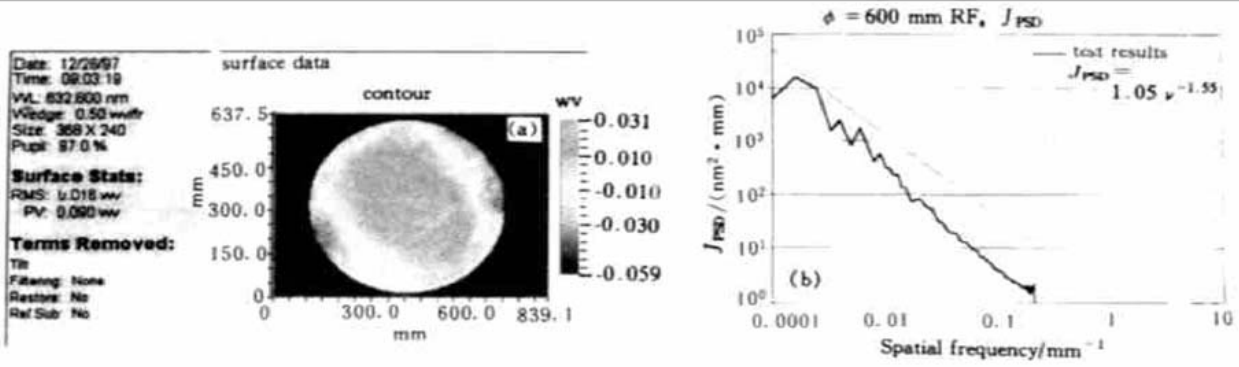


Fig. 2 (a) The reflective wavefront error of a flat; (b) The calculated  $J_{PSD}$

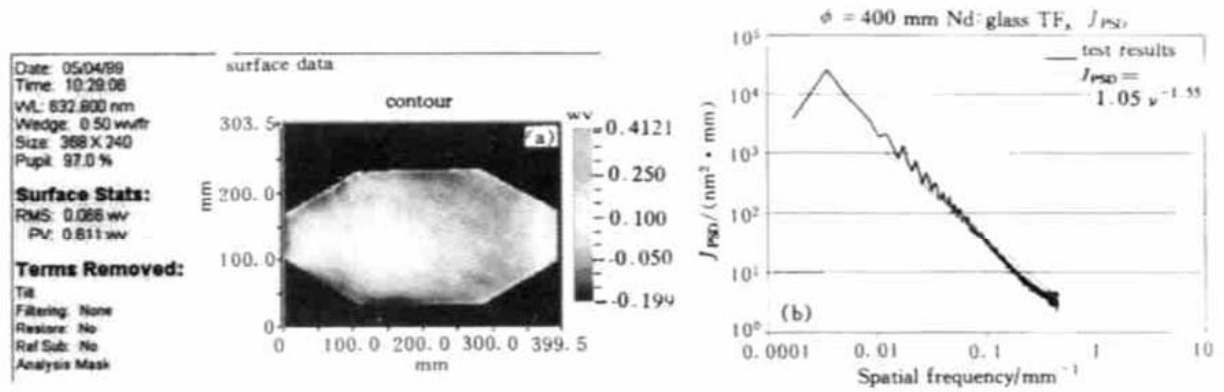


Fig. 3 (a) The double-pass transmission wavefront error of a Nd:glass flat; (b) The calculated  $J_{PSD}$

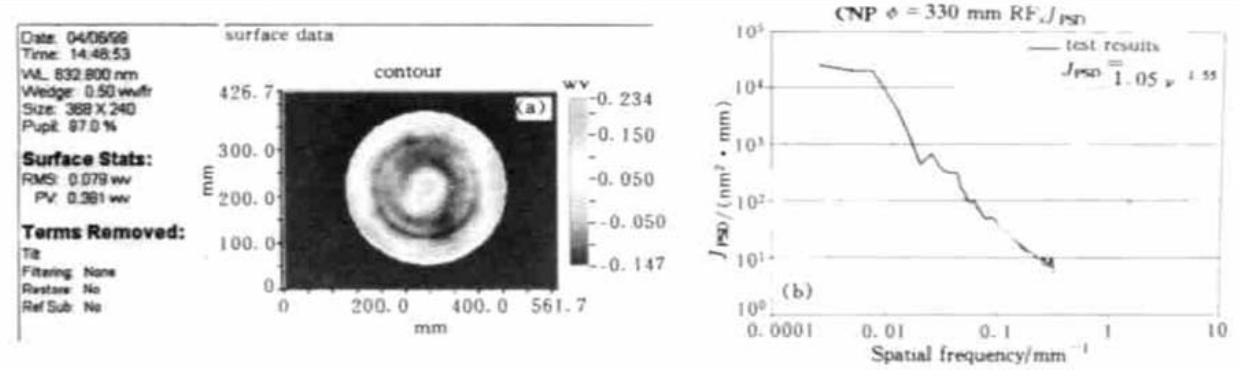


Fig. 4 (a) The reflective wavefront error of a flat fabricated by computer-controlled polishing; (b) The calculated  $J_{PSD}$

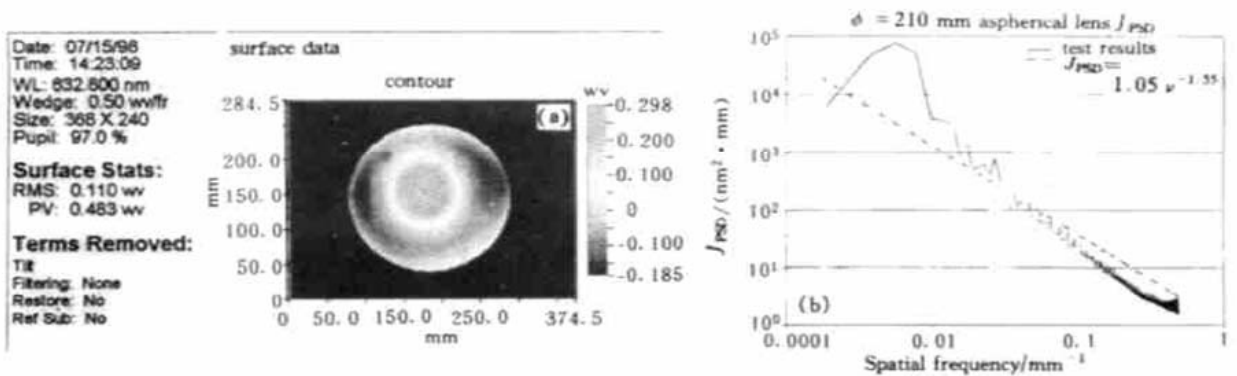


Fig. 5 (a) The single-pass transmission wavefront error of an aspherical lens; (b) The calculated  $J_{PSD}$

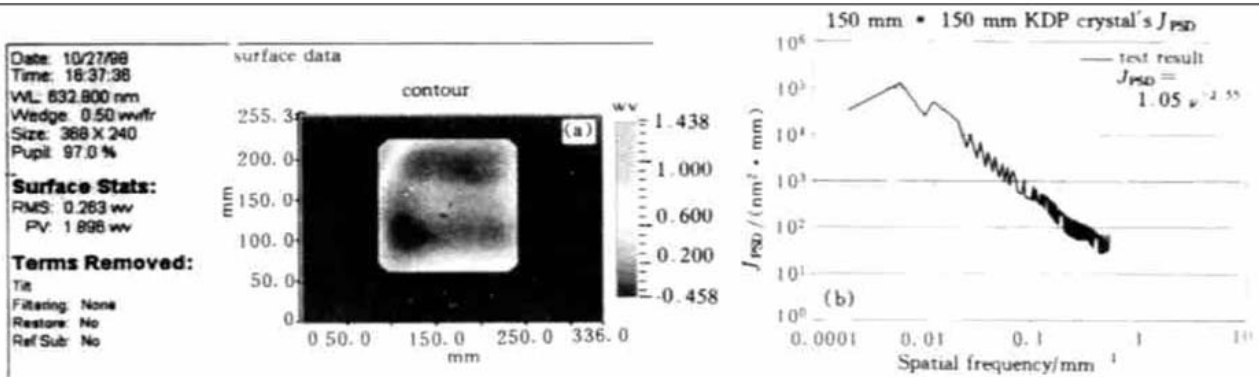


Fig. 6 (a) The double-pass transmission wavefront error of a KDP crystal; (b) The calculated  $J_{PSD}$

波前功率谱密度定量地给出了光学元件制造误差在空间频段的分布,为系统分析元件误差扰动对光束质量的影响提供了丰富的数据;且评价方式直观,便于实际操作。目前,我们初步实现了空间波长为 mm 量级的波前误差的检测,要实现更高频段(亚毫米空间波长)的测量,除在仪器空间测量带宽上改进以外,还需明确干涉仪空间滤波对高频分量的影响。这将在以后的论文中展开论述。应当指出,波前功率谱密度的测量方式同检测的物理指标密切相关,平面波前功率谱密度的检测与非平面波前功率谱密度的检测在干涉波面的形成上是不同的,波前功率谱密度的结果也将受到影响。例如,在测量非球面面形的波前功率谱密度时,需使用补偿器,这必

然会影响系统的空间频率传递函数,在波前功率谱密度的数据处理上可以统一归入系统影响因素加以考虑。

### 参 考 文 献

- [1] Hogan W J, Paisner J A. Progress in the title I design of the national ignition facility. USA, UCRL-JC-123560, 1996-06-28
- [2] Williams W H, Auerbach J M, Henesian M A *et al.*. Modeling characterization of the national ignition facility focal spot. USA, UCRL-JC-127907, 1998-01-16
- [3] Bespalov V I, Talanov V I. Filamentary structure of light beams in non-linear liquids. *JETP Lett.*, 1966, 3(3): 307~310
- [4] Lawson J K, Wolfe C R, Manes K R *et al.*. Specification of optical components using the power spectral density function. *Proc. SPIE*, 1995, 2536: 38~50

## Measurement of Wavefront Power Spectral Density of Large Optical Components

Xu Qiao Gu Yuanyuan Cai Lin Li Wei

(Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041)

(Received 18 August 1999; revised 22 November 1999)

**Abstract:** The optical components employed in high power density solid-state laser for inertial confinement fusion (ICF) must be measured at full aperture to provide the higher resolution measurements necessary to detect mid-spatial-frequency errors in the wavefront. The use of Fourier analysis techniques to measure the wavefront power spectral density (PSD) in mid-frequency domain is discussed. A large phase-shifting Fizeau interferometer is used for the measurement. The phase wavefront detected by the interferometer is digitally processed to create one dimension wavefront PSD. The PSD of several optical components are shown.

**Key words:** optical component specification; optical measurement; wavefront power spectral density