

文章编号 1004-924X (2001)02-0142-04

光纤点衍射干涉仪的技术研究

刘国淦, 张学军, 王权陆, 张忠玉, 郭培基, 张 峰, 齐涤菲

(中科院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 提出一种用光纤实现点衍射干涉的方法, 由两根光纤分别传输参考光和测试光, 利用单模光纤的小纤芯所产生的高质量衍射球面波进行超精面形的测量。与传统的干涉仪相比, 该方法结构相对简单, 误差来源少, 且不需要传统干涉仪中的高质量标准面, 而是由光纤提供高精度的参考波面。

关键词: 干涉仪; 点衍射; 相移; 光学纤维

中图分类号: O 436.1 **文献标识码:** A

1 引言

光学技术的不断发展, 要求光学仪器的精度不断提高, 为了满足这种高精度的要求, 光学设计对光学元件的面形精度提出了更高的要求, 随着加工技术的发展, 高精度的面形加工很大程度上受到检测能力的限制, 没有高精度的检测设备, 就无法知道加工的结果, 所以提高光学检测的能力是提高光学仪器精度的重要因素。在极紫外光刻中对一些球面要求有很高的面型精度, 约为 $0.25\text{nm RM S} \sim 1\text{nm RM S}$ 。换算成可见光波长 (632.8nm) 约为 $\lambda/2400 \sim \lambda/600\text{RM S}$ 。在 $x\text{-ray}$ 太阳望远镜中, 一些球面要求有 $1.25\text{nm RM S} \sim 5\text{nm RM S}$ 的精度, 对应于可见光为 $\lambda/500 \sim \lambda/120\text{RM S}$ 。对于这些球面的检测, 若用工作波长来测量, 则造价高, 实现困难, 常适用于评价镀多层膜后元件或衍射极限系统。若用可见光波长测量, 则造价相对低, 实现容易, 操作简单, 它适用于评价基片或分辨率不高的系统。但是, 现有的商用可见光干涉仪检测所能达到的精度: 平面 $\lambda/100\text{RM S}$, 球面 $\lambda/60\text{RM S}$, 它的误差主要来源于标准面本身的误差。本文从点衍射的原理出发, 在当前先进的光纤工艺技术的基础上, 提出光纤点衍射干涉仪思想。

2 实验方案

点衍射干涉仪的基本原理是用小孔产生接近

理想的波前与被测波前干涉, 形成条纹, 从而测出被测波前的质量, 如图 1 所示^[1], 使用中会被检的会聚波前通过中间带有一个小孔的半透平板, 小孔的直径约为会聚波前爱里斑的大小, 会聚波前一部分透过平板, 另一部分经小孔衍射形成一近似理想的球面波, 这两部分相干形成条纹。它结构简单, 操作容易。但是平板和圆孔制作困难, 而且只能检测透过的会聚波前, 所以只适合检测整个光学系统的质量。

光纤点衍射用光纤代替小孔, 来产生球面波, 比小孔更容易操作, 它能用来检测凹球面, 所以它更实用。

在实验中, 所设计的光路见图 2。由激光器发出的光经过分光镜, 分成两束分别耦合到参考光纤和检测光纤中, 其中检测光纤的光经凹球面反射到参考光纤端面, 和它发出的光形成干涉, 由 CCD 相机接收输入计算机。

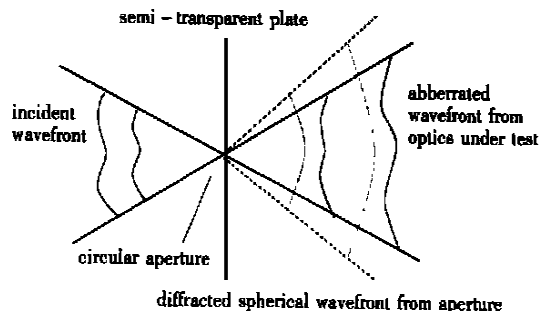


Fig 1 Principle of point diffraction interferometry

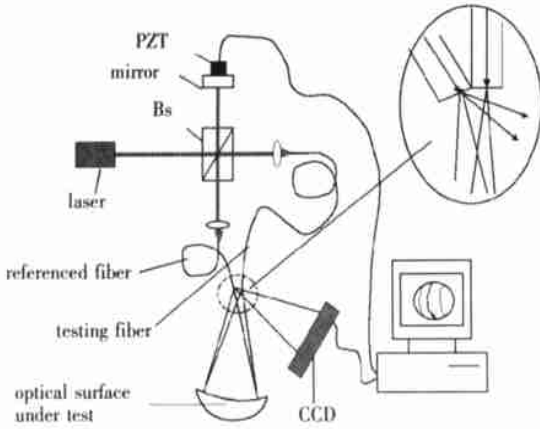


Fig 2 Light path for the interferometer

分光镜选择分光比大约 4:96, 参考光纤端面镀 50% 的反射膜。计算两部分光到达 CCD 上的光强: 设激光的光强为 I , 反射镜近似为全反射, 透镜光纤的耦合效率为 η , 则由参考光纤到达 CCD 的光强 I_1 为:

$$I_1 = I \times 4\% \times 96\% \times 25\% \times \eta$$

$$= 0.96\% \times \eta \times I \quad (1)$$

一般地, 未镀膜的被测镜的反射率为 4%, 所以由检测光纤到达 CCD 上的光强 I_2 为:

$$I_2 = I \times 96\% \times 4\% \times 25\% \times \eta$$

$$= 0.96\% \times \eta \times I \quad (2)$$

由以上两式可以看出光强刚好匹配。分别耦合到两光纤中的光强还可通过光纤耦合器来调整, 实现光强匹配。

图 2 中, 激光进入光纤以前, 要经过分光镜和耦合透镜, 这些光学元件的面形误差不会影响最终输出波前的质量, 这是因为光纤的纤芯很细, 它本身就相当于一个空间低通滤波器, 面形误差引起的杂光进不了光纤。但是, 如果面形误差引起的杂光太多, 就会使进入光纤的光强变弱, 降低耦合效率, 所以为提高耦合效率, 这些面形误差不宜太大。

单模光纤中还存在材料色散和波导色散, 这些色散都会引起相位偏差, 这些偏差会引起干涉条纹对比度的下降。材料色散和波导色散都是由于光源的谱线宽度 (Δf) 造成的, 所以采用窄谱线宽度的激光器, 以减小这些色散带来的偏差 (在实验中发现, 这些偏差带来的影响不大, 并且通过条纹软件处理技巧可基本消除)。另外窄的谱线宽度就意味着有较好的时间相干性, 它可使干涉对光路的长度不敏感, 这样被检测的球面半径可以在较大的范围内变化, 所以激光器最好用单模稳频的 He-Ne 激光器。它的频谱宽度和频率漂移都

很小。

另外, 用光纤来导波的最大优点是在单模光纤中只能传输一个模式的光, 只有满足

$0 < V < 2.40483$ V 为阶跃光纤归一化频率条件的光才能在光纤中传播, 其他模式的光在光纤中传播一段后便衰减掉。这也是衍射波有高质量波前的重要原因。

理论上, 单模光纤只传输一个基模, 实际上由两个模式, 电场沿光端面的两个坐标方向极化, 理想的轴对称光纤中, 这两个模式有相同的相位常数, 它们是互相简并的, 但在实际光纤中, 可能由于光纤形状、折射率、应力等的不均匀, 这两种模式的相位常数不一致, 传输一段距离后形成相位差。所以, 实验中要在光耦合到光纤中之前, 加上偏振片滤光, 这样便可保证输出光强的稳定性。

由衍射的理论可知, 纤芯的直径 a 为:

$$a = 1.22\lambda/NA \quad (3)$$

要把光耦合到 $2.4\mu\text{m}$ 的光纤中, 数值孔径应该不小于 0.32, 实验中所用单模光纤只能传输 NA 为 0.16 的光, 所以必然有一部分光要损耗掉, 实际中激光入射的 NA 小于 0.32, 这样必然造成会聚光斑大于 $2.4\mu\text{m}$, 光纤在这里也起到了滤波的作用, 实验中所用的光纤入射数值孔径为 0.20, 主要有两个原因, 第一, 让进入光纤的光基本为能传输的单模光, 高次模很少, 这种情况下, 光纤不需要太长, 就能滤掉高次模, 这样, 由光纤色散, 纤芯不圆, 折射率不均匀性带来的误差就不会太大, 所以数值孔径不能太大; 第二, 数值孔径太小则爱里斑太大, 耦合效率降低。实验中的最大耦合效率约为 20%, 具体应用中, 这个效率可通过光纤耦合器在 0~20% 之间调整, 以达到两根光纤光强匹配。

由光纤产生衍射球面波的质量最主要取决于光纤的直径, 光纤的直径的大小决定了衍射光的数值孔径和偏离球面波的误差。

直径越小, 衍射光的数值孔径越大, 则检测范围就越大, 阶跃单模光纤中光场呈零阶贝塞尔函数分布; 可近似认为符合高斯分布^[2], 它的模场角半径为

$$\theta = \lambda/(\pi\omega) \quad (4)$$

其中 ω 为光腰直径, 这里近似认为是纤芯的直径 a , 实验中采用的纤芯直径为 $2.4\mu\text{m}$ (4λ), 所以可检测元件的相对孔径 D/f 应小于 $2\tan(\theta) = 0.168$ 。

衍射波前偏离球面波的误差和光纤纤芯直径

有图 3 所示的关系^[3], 预计纤芯的直径为 $2.4\mu\text{m}$ (4λ) 的衍射球面偏差在 $0.1NA$ 时小于 0.00001λ

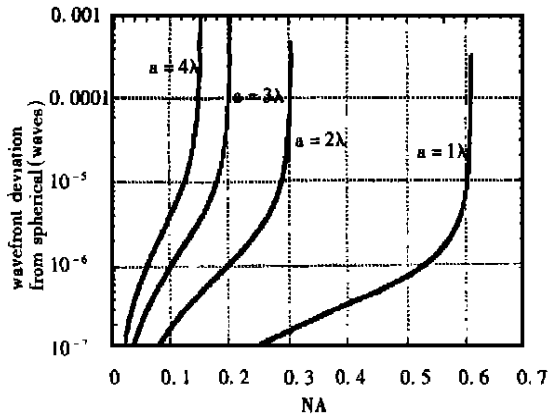


Fig 3 Plot of the deviation of a diffraction wavefront from spherical for different aperture radii a

由图 2 可以看出, 因为两光纤纤芯有一定的距离 d , 由被侧面反射回来的光并非沿原光轴返回, 而是返到另一根光纤的端面, 它相当于引入了一个离轴量 d , 这个离轴量会引起反射波前偏差, 它们之间有表 1 所示的关系。

Table 1 Relation of the deviation of wavefront for different distant 'd'

d	wavefront errors	
	RMS	PV
0	0	0
0.10472	$3.1E-5$	$1E-4$
0.20944	$1.2E-4$	$6E-4$
0.31416	$2.7E-4$	0.0013
0.41888	$4.8E-4$	0.0023
0.5236	$7.4E-4$	0.0036
0.62832	0.00105	0.0051
0.73304	0.00143	0.007
0.83776	0.0019	0.0091
0.94248	0.0024	0.0115
1.0472	0.0029	0.0142
1.25664	0.00425	0.0205
1.5708	0.00655	0.032
2.0944	0.012	0.0569
2.61801	0.0185	0.0889
3.14162	0.026	0.128

表 1 是在待测镜面的半径为 300mm , 数值孔径为 0.1 时计算得出的结果, d 的单位是 mm , RMS 和 PV 的单位是波长 λ , 从表 1 中可以看出随 d 的增大, 波前误差迅速增大, 一般所用的单模光纤的包层直径不会超过 0.5mm , 从表 1 中看出它的波前误差 RMS 值小于 $7.4E-4\lambda$, 相当于 $\lambda/1351$ 。

3 总体误差分析

(1) 光纤出来的球面波误差 $\Delta\omega$:

从图 3 可看出, 当 $NA = 0.1$, $a = 4\lambda$ 时球面误差小于 $\lambda/100000$, 实验中, 考虑到纤芯直径的误差, 预计误差可以控制在 $\lambda/1000\text{RMS}$ 内。

(2) CCD 固定背景噪声及非线性:

干涉场中光强度分布为:

$$I(x, y) = S(x, y) \times [I_d(x, y) + I_a(x, y) \times \cos(\varphi_{x, y} + \delta)] + n(x, y) \quad (5)$$

$S(x, y)$ — CCD 灵敏度的非线性分布

$n(x, y)$ — 固定背景噪声

采用平均四步相移的方法来求相位

$$\varphi = \frac{1}{2} \times \tan^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} + \frac{1}{2} \times \tan^{-1} \frac{I_5 - I_3}{I_2 - I_4} \quad (6)$$

可以自动消除上面两种误差影响。

预计 $\Delta\omega < \lambda/500\text{RMS}$ 。

(3) 离轴所引起的彗差 $\Delta\omega$:

由表 1 可知, 它可以做到小于 $\lambda/1667$ 。

$$I_i(x, y) = \frac{1}{\Delta} \cdot \int_{\delta - \Delta/2}^{\delta + \Delta/2} I(x, y, \delta) d\delta \quad (7)$$

(4) 随机噪声的影响 $\Delta\omega$:

在每步相移变化时, 作积分平均:

它可以消除误差, 使之在 $\lambda/700\text{RMS}$ 以内。

(5) 空气扰动及振动误差:

高精度测量时, 空气扰动和振动引起的误差不能不考虑, 通过使干涉臂与大气隔离, 干涉仪放置防震工作平台上来消除误差。

系统总体误差归纳为:

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= \sqrt{\Delta\omega_1^2 + \Delta\omega_2^2 + \Delta\omega_3^2 + \Delta\omega_4^2} \\ &= 0.00272\lambda = \frac{\lambda}{368} \end{aligned} \quad (8)$$

4 结束语

现阶段商用干涉仪的精度一般为球面 $\lambda/100\text{RMS}$ (波长为 632.8nm), 本文介绍的点衍射干涉仪的理论精度可达到 $\lambda/368$, 此干涉仪原型已研制成功, 进一步实验正在进行中, 用它对凹球面^[4]进行测量, 得到较好的结果, 因此本干涉仪的研制具有重要的实际意义。

参考文献:

- [1] Malacara Daniel. Optical shop testing[M]. 北京: 机械工业出版社, 1978
- [2] 刘德民, 向清, 黄德修. 光纤光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995
- [3] Sommargren Gary E. Phase shifting diffraction interferometry for measure extreme ultraviolet optics[A]. OSA Annual Meeting[C]1997.
- [4] 张忠玉, 余景池. 用补偿器测量非球面的研究[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(1): 125- 129

Fiber point diffraction interferometer

L U Guo-gang, ZHANG Xue-jun, WANG Q uan-dou, ZHANG Zhong-yu,
GUO Pei-ji, ZHANG Feng, Q I D i-fei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, State Key Lab of Applied Optics, Changchun 130021, China)

Abstract: A method implementing point-diffraction interferometry based on fiber is proposed. Two fibers transmit reference wave and testing wave, respectively, the high quality diffractive spherical wavefront created by single mode fiber can be used for measuring super-precision surface. Compared with conventional interferometers, the configuration is easier and less error. Instead of the traditional standard surface, the fiber will provide high quality reference wavefront.

Key words: interferometers; point diffraction; phase-shift; optical fibers

作者简介: 刘国淦(1976-), 男, 江西九江人, 长春光机所在读硕士研究生, 从事光学检测技术研究。

中国光学与应用光学文摘

《中国光学与应用光学文摘》(双月刊)是由中科院文献情报中心、中科院光学情报网和中科院长春光学精密机械与物理研究所联合主办, 经国家科委批准的国家一级检索期刊。该刊主要收集我国科研人员在国内外期刊中发表的有关光学、光电子学以及光学在各领域的应用等方面的论文, 国内召开的有关会议论文和国内有关单位的学位论文。该刊 1985 年创刊, 现全部以文摘形式报道国内光学领域的最新研究成果与进展。每期报道文献 750 篇。

2001 年《中国光学与应用光学文摘》仍通过邮局发行, 邮发代号: 12- 140, 定价 9.00 元/期, 订阅本刊的新老订户可去邮局订阅该刊, 在邮局漏订或想补订该刊的订户, 可随时与《中国光学与应用光学文摘》编辑部联系, 银行汇款与邮局汇款皆可。

单 位: 中科院长春光学精密机械与物理研究所《中国光学与应用光学文摘》编辑部

邮 编: 130021

银 行: 中行吉林省分行营业部

账 户: 04 单位 438 部

账 号: 018211000889

地 址: 吉林省长春市工农大路 61 号

联系人: 杨妹清

电 话: (0431)5684692 转 2438

E-mail: xxfw@ciomp.ac.cn