

迈克耳孙干涉仪中的镜面面形误差研究分析

冯明春 刘文清 徐亮* 高闽光 魏秀丽 童晶晶 李相贤 陈军

中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 从迈克耳孙干涉仪干涉原理出发,分析了圆形镜面抛光面形误差对干涉调制度的影响。由于存在镜面面形误差,干涉调制度不能达到理想情况下的100%,但其干涉调制度不能低于理想情况下的90%。通过分析和讨论,镜面面形误差最好控制在 $\lambda/14$ 以内,干涉调制度才可能不低于90%,这样干涉仪才能保持比较满意的性能。同时,使用Zygo干涉仪对5组平面镜的平面度进行了测量,得到了这5组平面镜的峰-峰值和其他一些参数,通过分析测量结果,这5组平面镜的平面度都能达到干涉调制度的要求。通过对迈克耳孙干涉仪中平面镜面形误差的研究,这对于干涉光谱仪的设计、研制和性能的分析都具有一定的指导意义。

关键词 成像系统;迈克耳孙干涉仪;镜子;面形误差;调制度

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0423002

Analysis of the Mirror Surface Errors in a Michelson Interferometer

Feng Mingchun Liu Wenqing Xu Liang Gao Minguang Wei Xiuli

Tong Jingjing Li Xiangxian Chen Jun

Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The effect on modulation depth caused by polish errors is analyzed from the interference principle of Michelson interferometer. The modulation depth cannot achieve ideally 100% due to surface errors, but the modulation depth cannot be below 90% in an ideal case. Through the analysis and discussion, it may be established that the surface errors should be plane to about $\lambda/14$ or better so that the modulation depth is not below 90% for satisfactory performance of the interferometer. At the same time, flatness for 5 mirrors is measured by Zygo interferometer so as to get peak to peak value and some other parameters. The flatness requirements of modulation depth is met according to the analysis of the measured results. Based on the study of the surface errors of the Michelson interferometer, it is a certain guiding significance to design, develop and analysis performance for an interference spectrometer.

Key words imaging systems; Michelson interferometer; mirror; surface error; modulation depth

OCIS codes 230.4040; 240.5450; 240.6700

1 引 言

傅里叶变换光谱(FTIR)技术起源于19世纪中后期,一百多年来得到了突飞猛进的发展。傅里叶变换光谱^[1-2]方法是利用干涉图和光谱图之间的对应关系,通过测量干涉图并对干涉图进行傅里叶积分变换的方法来测定和研究光谱图。

收稿日期: 2014-10-14; 收到修改稿日期: 2014-11-13

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ22064302)、国家自然科学基金(41105022, 41305020)、中国科学院战略性先导科技专项(XDB050405000, XDB05050300)

作者简介: 冯明春(1980—),男,博士研究生,主要从事干涉仪的性能分析和仿真等方面的研究。E-mail: mcfeng@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘文清(1954—),男,研究员,博士生导师,主要从事环境监测技术和应用等方面的研究。

E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

*通讯联系人。E-mail: xuliang@aiofm.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

傅里叶变换光谱仪(FTS)^[3]是一种精密的科学仪器,它具有多通道、高通量、波数准确度高等优点,在科学研究、环境监测、工农业生产、航空航天遥感等领域有着广泛的应用。

迈克耳孙干涉仪的突出优点是灵敏度高,结构相对简单,可依靠动镜移动产生大的光程差,进而实现高光谱分辨率的探测;它的缺点在于扫描运动的动镜必须作高精度的匀速直线运动,垂轴偏摆很小,这样对系统机械性能提出了很高的要求。

在迈克耳孙干涉仪中,动镜是唯一不断运动的部件。同时,动镜在运动过程中,由于速度不稳定以及动镜倾斜都直接影响着干涉调制度,文献[4]详细分析了矩形通光孔径和圆形通光孔径下动镜倾斜误差容限。除去动镜运动过程中倾斜因素影响干涉调制度以外,迈克耳孙干涉仪的动镜和定镜面形误差也会对干涉调制度的大小产生影响,针对这一问题,本文重点分析了动镜和定镜面形误差对干涉调制度的影响。

2 原 理

对干涉信号调制度的分析能够为光谱仪的优化设计和性能指标提供了理论依据,同时干涉仪的信噪比也受到干涉仪的调制度的影响。

定义干涉信号的调制度 M ,也即是干涉信号的可见度 V 。在接收屏上一个选定的区域中,取光强最大值 I_{\max} 和最小值 I_{\min} ,则:

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1)$$

(1)式表征了干涉场中某处条纹明暗反差的程度。

依据光的干涉理论,由双光束干涉产生的干涉信号强度分布为^[5]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi = (I_1 + I_2) \left(1 + \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \cos \varphi \right), \quad (2)$$

式中 I_1 和 I_2 分别为经过分束器后两束相干光的强度, φ 为两相干光束的相位差。

根据 M 的定义式可得:

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}, \quad (3)$$

因此,(2)式可以改写为

$$I = (I_1 + I_2)(1 + M \cos \varphi), \quad (4)$$

由(4)式可知,当且仅当 $I_1 = I_2 = I_0$ 时,也就是说,当两束相干光的强度相等,干涉调制度取最大值时,即 $M = 100\%$,这时,(4)式变为 $I = 2I_0(1 + \cos \varphi)$,但考虑到实际应用情况,干涉信号调制度 M 将会小于 100% 。

3 理论分析

假设迈克耳孙干涉仪中的动镜和定镜都是由圆形孔径的平面反射镜组成,如图1所示。在平面反射镜的制作加工过程时,由于平面反射镜受到抛光、镀膜等因素的影响,使得这些平面镜不能获得理想的面形,

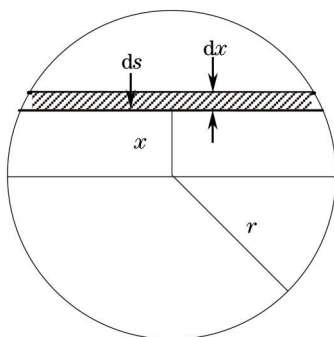


图1 圆形孔径

Fig.1 Circular aperture

产生一定的镜面面形误差。在由这些平面镜组成的迈克耳孙干涉仪中,使得干涉信号调制度小于理想光学元件情况下的干涉调制度。假设干涉机构中的其他光学元件都是理想的,设镜面抛光误差服从矩形概率分布,最大起伏为 Δ_{\max} ,如图2所示。

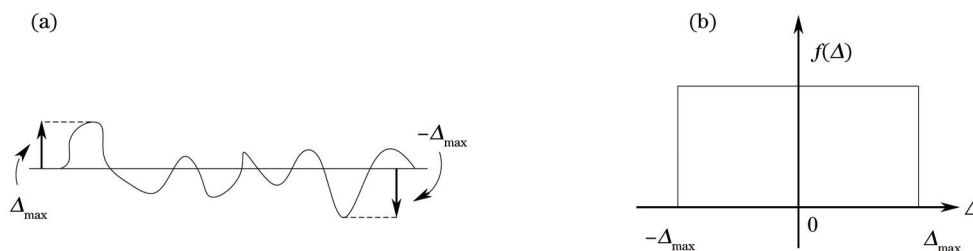


图2 镜面抛光误差及其矩形分布

Fig.2 Polish errors of mirror and the associated rectangular distribution

当平面反射镜镜面出现面形误差时,两束相干光经过平面镜反射时将会产生额外的附加光程差,从而使得两相干光束的相位差 φ 也随之变化。对于镜面抛光误差一个小的改变量 Δ ,则相干光束相位差 φ 的改变量为

$$\delta\varphi = 2\pi\tilde{\nu}(2\Delta), \quad (5)$$

式中, $\tilde{\nu}$ 为入射光波数。假定定镜和动镜虚像的距离为 δ , 在 δ 中小的变化 Δ , 如果 $f(\Delta)$ 代表表面误差分布, 面元 ds 在 $\delta + \Delta$ 和 $\delta + \Delta + d\Delta$ 可以表示为 $ds = f(\Delta)d\Delta$ 。由于面形误差的作用, 这时干涉信号强度分布^[6]为

$$I = \frac{\int I'(\varphi)ds}{\int ds}. \quad (6)$$

由图1阴影所示, 可得 $ds = 2(r^2 - x^2)^{1/2} dx$, 代入(6)式:

$$I = \frac{2I_0}{\pi r^2} \int_{-r}^{+r} 2(r^2 - x^2)^{1/2} \{1 + \cos[\varphi + 2\pi\tilde{\nu}(2\Delta)]\} dx. \quad (7)$$

令 $x = r \cos \alpha$, $\Delta \approx x\theta$, 代入(7)式可得

$$I = 2I_0 \left[1 + 2 \frac{J_1(4\pi\tilde{\nu}\Delta_{\max})}{4\pi\tilde{\nu}\Delta_{\max}} \cos \varphi \right]. \quad (8)$$

因此, 干涉信号调制度为

$$M = \frac{2J_1(4\pi\tilde{\nu}\Delta_{\max})}{4\pi\tilde{\nu}\Delta_{\max}}, \quad (9)$$

式中调制度 M 函数中的 J_1 为一阶第一类贝塞尔函数, 如果要求干涉调制度 M 不小于 90%, 则偏移量 Δ_{\max} 应满足:

$$\Delta_{\max} \leq \frac{\lambda}{14}. \quad (10)$$

根据(8)式, 作出面形误差存在时的强度分布图, 如图3所示。在图3中, 一共有4条曲线, 其中红色虚线代表的是理想情况下的强度分布, 黑色、蓝色和绿色曲线分别对应的是 $\Delta_{\max} = \lambda/20, \lambda/14, \lambda/10$ 的强度分布。

根据(9)式, 作出镜面面形误差存在时的干涉调制度分布图, 如图4所示。

从干涉调制图 M 曲线中可以得到, 当 $\Delta_{\max} = \lambda/20, \lambda/14, \lambda/10$ 时, 对应的 M 干涉调制度分别为 95%, 90%, 85%。镜面面形误差影响着干涉调制度, 其干涉调制度不能低于理想情况下的 90%, 从上面分析数据可以看出, 镜面面形误差最好控制在 $\lambda/14$ 以内, 干涉仪才能保持比较好的性能。

4 实验部分

使用 Zygo 平面干涉仪对 5 组平面镜的平面度进行了测量, 其测量界面图如 5 所示。

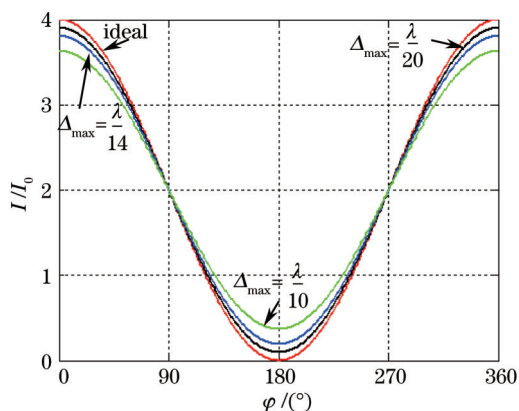


图3 面形误差存在时的强度分布

Fig.3 Intensity distribution in the presence of the surface errors

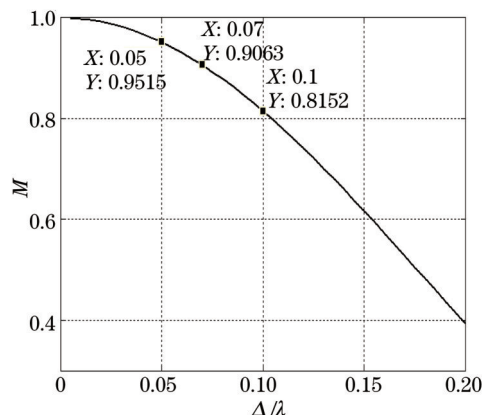


图4 面形误差存在时的调制度

Fig.4 Distribution of modulation depth in the presence of the surface errors

假定 Zygo 干涉仪测量结果服从矩形均匀分布,根据 Zygo 干涉仪测量结果,分别对这 5 组平面镜的平面度测量结果进行作图,同时结合测量结果对每一点所对应的干涉调制度进行作图,其图形如 7 所示。

图 6 上半部分对应的是 5 组平面镜面形误差分布图,下半部分对应的是每一组各点的干涉调制度,其干涉调制度大小都在 90%以上,满足干涉调制度的要求。使用 Zygo 平面干涉仪测量得到它们的峰谷值(PV)分别为 0.04、0.03、0.10、0.03 和 0.02,测量得到的均方根(表面粗糙度 RMS)值分别为 0.011、0.006、0.029、0.009 和 0.006;计算得到的标准偏差(描述各数据偏离平均数的距离的平均数,是离差平方和均方根)分别为 0.011、0.006、0.028、0.008 和 0.006。从上面理论分析,圆形面形误差最好控制在 $\lambda/14$ 以内,即对应波长的 0.071,计算出的这 5 组误差偏移量都在 0.071 以内,所以都符合镜面面形误差的要求,具体数值如表 1 所示。

为了与理想情况下的镜面面形对比,以取第 2 和第 5 组平面镜面形误差为例,作出面形误差如图 7 所示,图 8 为图 7 所示面形误差各点所对应的干涉调制度。

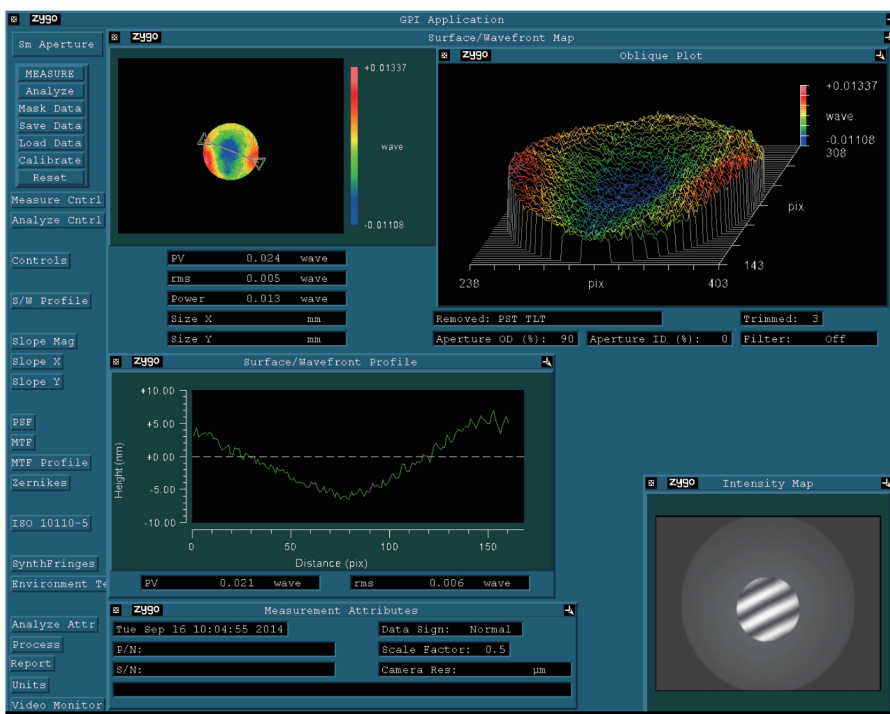


图5 Zygo 界面图

Fig.5 Graphic interface of Zygo

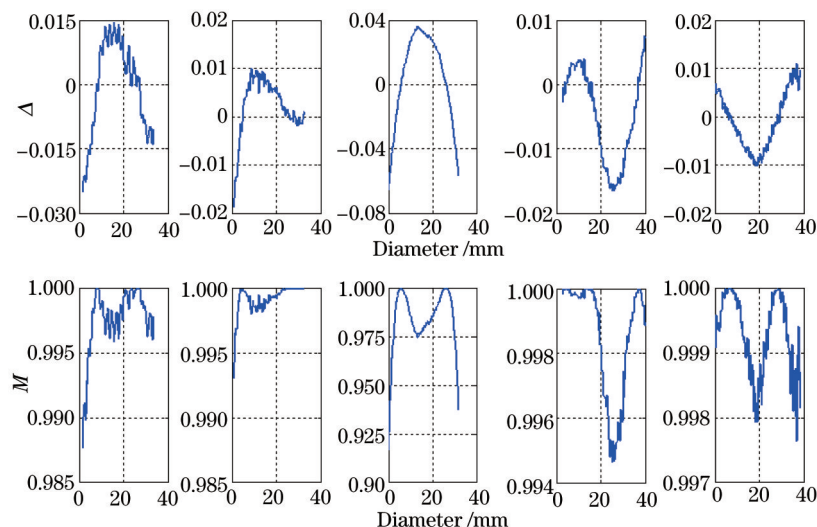


图6 镜面面形误差和调制度

Fig.6 Mirror surface errors and the associated modulation depth

表1 平面镜的平面度参数

Table 1 Flatness parameters of the plane mirror

Number	PV	RMS	Standard deviation	Max	Min
1	0.04	0.011	0.011	0.014	-0.025
2	0.03	0.006	0.006	0.010	-0.019
3	0.10	0.029	0.028	0.036	-0.066
4	0.03	0.009	0.008	0.013	-0.017
5	0.020	0.006	0.006	0.011	-0.010

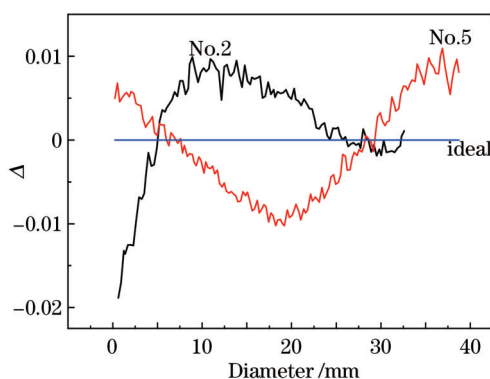


图7 镜面面形误差

Fig.7 Mirror surface errors

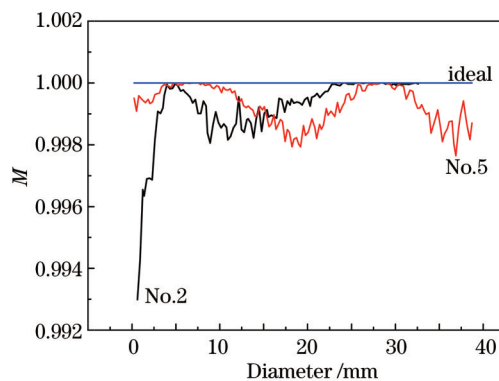


图8 干涉调制度

Fig.8 Modulation depth of the interference

从图7和图8中容易看出,蓝色曲线分别对应的是理想情况下镜面面形误差 $\Delta=0$,对应的干涉调制度为100%;黑色曲线分别对应的第2组的镜面面形误差和干涉调制度;红色曲线分别对应的第5组的镜面面形误差和干涉调制度。由于存在镜面面形误差时,其干涉调制度小于100%,但干涉调制度都在90%以上,对应的镜面面形误差都在 $\lambda/14$ 以内,符合镜面面形误差的要求。

5 结 论

根据以上的分析和实验数据可知,镜面抛光误差对干涉信号调制度造成了一定的影响,为了获取较好的干涉调制度,平面反射镜面误差应在一定的容限要求下。对于圆形通光孔径,面形误差最好控制在 $\lambda/14$ 以内,干涉调制度才能不低于90%。使用Zygo干涉仪对5组平面镜的平面度进行了测量,5组平面镜的平面

度都在面形误差之内,满足干涉调制度的要求。通过对干涉仪中平面镜的平面度理论分析和实验验证,为干涉仪的性能指标和具体参数提供了有力支持。

参 考 文 献

- 1 Griffiths Peter R, De Haseth James A. Fourier Transform Infrared Spectrometry, Second Edition [M]. New York: Wiley&Sons, 2007.
- 2 Wu Jinguang. Modern Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Its Application · Volume One [M]. Beijing: Science and Technical Documentation Press, 1994.
吴瑾光. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用·上册[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- 3 Sean F Johnston. Fourier Transform Infrared—A Constantly Evolving Technology [M]. Chicester: Ellis Horwood Ltd, 1991.
- 4 Xiangli Bin, Yang Jianfeng, Gao Zhan, *et al.*. On the tolerance of the mirror tilting in Fourier transform interferometer [J]. Acta Photonica Sinica, 1997, 26(2): 132–135.
相里斌, 杨建峰, 高 瞻, 等. 干涉光谱仪动镜倾斜误差容限分析[J]. 光子学报, 1997, 26(2): 132–135.
- 5 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- 6 P K Katti, K Singh. A note on the surface accuracy and alignment of the end mirrors in a Michelson interferometer [J]. Appl Opt, 1966, 5(12): 1962–1964.

栏目编辑: 韩 峰