

文章编号:1002-2082(2006)03-0250-04

用迈克尔逊干涉仪测量全息干板膜厚度

蒋 礼, 罗少轩, 阳 艳, 杨科灵

(中南大学 物理科学与技术学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 全息干板膜的厚度是全息干板的重要参数之一。使用迈克尔逊干涉仪和白光光源对 2 种全息干板膜厚度进行测量, 并对测量结果误差进行分析, 给出了测量误差与膜厚及折射率之间的关系以及此方法的适用范围。研究结果表明: 在膜厚从 $8\ \mu\text{m}$ 增至 $41\ \mu\text{m}$ 的过程中, 测量结果的绝对误差 $\leq 2\ \mu\text{m}$ 且变化很小, 相对误差则从 14.1% 降到了 2.2%。随着膜厚的增加, 相对误差明显降低; 折射率 n 也参与了误差传递, 其值与测量误差呈类似反比关系; 当 n 值在 1.5 附近时, 为保证测量的准确性, 所测膜厚 $\geq 40\ \mu\text{m}$ 。最后指出, 迈克尔逊干涉仪在测量全息干板膜等较厚的薄膜时, 具有测量范围大, 结果较准确等优点。

关键词: 迈克尔逊干涉仪; 白光干涉; 全息干板膜; 膜厚测量

中图分类号: O484.5

文献标志码: A

Thickness measurement of thin film for holographic plate by Michelson interferometer

JIANG Li, LUO Shao-xuan, YANG Yan, YANG Ke-ling

(School of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Thin-film thickness is one of the most important parameters for holographic plate. Thin-film thicknesses of two types of holographic plates were measured by Michelson interferometer which took the white light as its incident source. By analyzing the errors of the results, the relation of the measurement errors to thin-film thickness and refractive index, and the applicable range of this method were studied. The result shows that with the increasing of film thickness, when it is from $8\ \mu\text{m}$ to $41\ \mu\text{m}$, the absolute errors are $\leq 2\ \mu\text{m}$ with little fluctuations, but the relative errors decrease from 14.1% to 2.2%. The value of refractive indexes contributes to error propagation, and it is inversely proportional to absolute errors. In order to guarantee the validity of results, the thicknesses of films should be $\geq 40\ \mu\text{m}$ when the refractive indexes are about 1.5. There are some advantages, such as a large measuring range, fewer experiment instruments and accurate result, when Michelson interferometer is used to measure some thicker thin films.

Key words: Michelson interferometer; white light interference; thin film of holographic plate; measurement of thin-film thickness

收稿日期: 2005-08-06; 修回日期: 2005-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助(50376076)

作者简介: 蒋礼(1957—), 男, 湖南岳阳人, 中南大学教授, 主要从事电子器件的介观尺度效应和热可靠性研究; 通信作者: 罗少轩(1980—), 男, 湖南岳阳人, 中南大学硕士研究生, 主要从事物理电子学研究。E-mail: lsx_main@yahoo.com.cn

引言

随着全息技术的不断发展,全息干板在科学研究和工业生产中得到了广泛使用。全息干板膜的厚度是全息干板的一个重要参数,对于其在全息技术中的应用具有重要的意义。全息干板膜的厚度一般从几微米到几十微米不等,对于普通椭圆测厚仪来说太厚,如果使用螺旋测微器测量则误差太大。目前,市场上也有不少专用的膜厚测量仪器,但价格昂贵。笔者通过巧妙设计,利用现有大学物理实验室中的迈克尔逊干涉仪完成了对全息干板膜的厚度测量。

迈克尔逊干涉仪光路直观,测量精度高,观察到的干涉现象丰富^[1],可以用于精确测量薄膜的厚度^[2-5]、折射率^[2,6]、介电常数以及压电陶瓷的压电常数等参数。实验中使用 WSM-100 型迈克尔逊干涉仪,GS-I 型和 RSP-I 型全息干板。

1 实验原理和方法

本次实验选用白光光源作为入射光源。因为其波长范围较大,相干长度很小,因此只有当迈克尔逊干涉仪的 2 臂光程接近相等时,才会有白光干涉条纹出现^[9]。设计实验原理如图 1 所示。首先不插入全息干板直接调出彩色干涉条纹。然后将一块全息干板上的薄膜刮去半边,并将其置于 M_2 前。调节 M_1 向后方移动,在此过程中又会出现 2 次彩色干涉条纹,这是因为干板有膜部分和无膜部分厚度不同,所以光程差为零时对应的 M_1 的位置也不同。

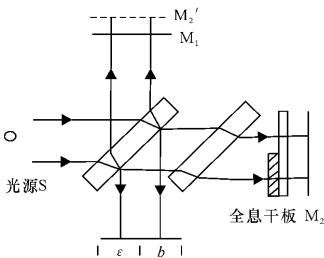


图 1 实验原理图

Fig. 1 Scheme of the experimental set-up

当插入第 1 种全息干板,2 次调出彩色干涉条纹时, M_1 的读数分别为 x_1 和 x_2 ;插入第二种全息干板时, M_1 的读数分别为 x_1' 和 x_2' ,膜厚和折射率分别为 d, d' 和 n_1, n_2 ,空气中的折射率 $n_0=1$,则:

$$x_2 - x_1 = (n_1 - 1)d \quad (1)$$

$$x_2' - x_1' = (n_2 - 1)d' \quad (2)$$

因此,只要知道了待测干板膜的折射率就可以利用上述公式求出其厚度。

2 实验现象

当未放入待测全息干板时,观察到的彩色条纹是平直的等厚干涉条纹。然后将刮去半边薄膜的全息干板置于 M_2 前,调节 M_1 向后移动。在观察屏上首先出现的是圆环型的彩色干涉条纹^[6],且位于观察屏的 b 侧。因为干涉条纹只有半边,所以看到的实际上是一组圆心近似位于观察屏中心的半圆,如图 2(a)和图 3(a)所示。继续向后调节 M_1 ,在观察屏的 a 侧会慢慢显现出另一组半圆型彩色干涉条纹,圆心同样近似位于观察屏的中心,但比 b 侧的条纹要稍微暗一些。由于第一种全息干板膜的厚度只有几微米,因此当观察屏 b 侧的彩色条纹还未完全消失时,a 侧的彩色条纹就已经显现了,如图 2(b)所示。这时若换上激光光源观察,观察屏上的干涉条纹如图 2(c)所示。

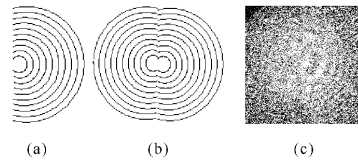


图 2 第 1 种全息干板的干涉条纹

Fig. 2 Interference stripes of the first holographic plate

第二种全息干板膜的厚度约有几十微米。当在观察屏 a 侧观察到彩色干涉条纹时,b 侧的条纹已经消失,如图 3(b)所示。这时若换上激光光源,观察屏上的干涉条纹如图 3(c)所示。

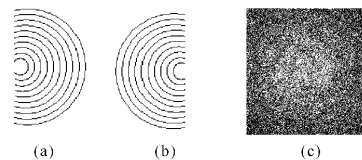


图 3 第 2 种全息干板的干涉条纹

Fig. 3 Interference stripes of the second holographic plate

3 实验结果及误差分析

按上述方法对 2 种全息干板膜进行了多次测量,分别选取一组 10 次连续测量的数据进行误差

分析。在 M_2 前插入第一种全息干板时 x_1 和 x_2 读数如表 1 所示。

表 1 放入第一种全息干板时 x_1 和 x_2 的读数

Table 1 The value of x_1 and x_2 after inserting the first holographic plate

测量次数	x_1 /mm	x_2 /mm
1	35.59738	35.60121
2	35.59682	35.60068
3	35.59720	35.60146
4	35.59705	35.60112
5	35.59625	35.60049
6	35.59701	35.60103
7	35.59745	35.60072
8	35.59661	35.60043
9	35.59627	35.60126
10	35.59732	35.60087

由以上数据可计算出 x_1 的平均值为 35.59694 mm, 标准偏差 $\sigma=0.00045$ mm。因为测量次数取 10 次, 所以可以用标准偏差来表述 A 类不确定度^[1], 即 x_1 的 A 类不确定度为 $u_A(x_1)=\sigma=0.00045$ mm。根据连续读数仪器的仪器误差取最小分度值的二分之一的原则, 取迈克尔逊干涉仪的仪器误差为 0.00005 mm, 则 x_1 的 B 类不确定度为 $u_B(x_1)=0.00005/\sqrt{3}$ mm=0.00003 mm。由此可以计算出 x_1 合成不确定度 $u(x_1)=\sqrt{u_A^2(x_1)+u_B^2(x_1)}=0.00045$ mm, 故 $x_1=(35.59694\pm 0.00045)$ mm。

同理, x_2 的平均值为 35.60093 mm, 标准偏差 $\sigma=0.00034$ mm。 x_2 的 A 类不确定度 $u_A(x_2)=0.00034$ mm, B 类不确定度 $u_B(x_2)=0.00005/\sqrt{3}$ mm=0.00003 mm, $u(x_2)=\sqrt{u_A^2(x_2)+u_B^2(x_2)}=0.00034$ mm, 故 $x_2=(35.60093\pm 0.00034)$ mm。将上述结果代入(1)式, 得

$$d = \frac{x_2 - x_1}{n_1 - 1} = \frac{35.60093 - 35.59694}{1.52 - 1} = 0.00767 \text{ mm} \approx 0.008 \text{ mm}$$

d 的不确定度为

$$u(d) = \sqrt{\left(\frac{1}{n_1 - 1}\right)^2 u^2(x_1) + \left(\frac{1}{n_1 - 1}\right)^2 u^2(x_2)} = 0.00108 \text{ mm} \approx 0.002 \text{ mm}$$

n_1 的值见参考文献[10]。

由以上公式求得的第一种全息干板上的薄膜厚度为

$$d = (0.008 \pm 0.002) \text{ mm}$$

在 M_2 前插入第 2 种全息干板时 x_1' 和 x_2' 的读数如表 2 所示。

表 2 放入第二种全息干板时 x_1' 和 x_2' 的读数

Table 2 The value of x_1' and x_2' after inserting the second holographic plate

测量次数	x_1' /mm	x_2' /mm
1	35.68482	35.70596
2	35.68450	35.70537
3	35.68420	35.70619
4	35.68446	35.70556
5	35.68427	35.70582
6	35.68495	35.70606
7	35.68521	35.70572
8	35.68503	35.70535
9	35.68432	35.70560
10	35.68463	35.70621

x_1' 的平均值为 35.68464 mm, 标准偏差 $\sigma=0.00035$ mm。 x_1' 的 A 类不确定度 $u_A(x_1')=0.00035$ mm, B 类不确定度 $u_B(x_1')=0.00005/\sqrt{3}$ mm。 x_1' 的合成不确定度 $u(x_1')=\sqrt{u_A^2(x_1')+u_B^2(x_1')}=0.00035$ mm, 故 $x_1'=(35.70578\pm 0.00032)$ mm。同理可求得 $x_2'=(35.70578\pm 0.00032)$ mm。将上述结果代入(2)式, 得

$$d' = \frac{x_2' - x_1'}{n_2 - 1} = \frac{35.70578 - 35.68464}{1.52 - 1} = 0.04065 \text{ mm} \approx 0.041 \text{ mm}$$

$$u(d') = \sqrt{\left(\frac{1}{n_2 - 1}\right)^2 u^2(x_1') + \left(\frac{1}{n_2 - 1}\right)^2 u^2(x_2')} = 0.00091 \text{ mm} \approx 0.001 \text{ mm}$$

n_2 的值见参考文献[10]。

由以上公式可求得第二种全息干板的薄膜厚度为

$$d' = (0.041 \pm 0.001) \text{ mm}$$

第二种全息干板膜的厚度与测量误差的关系如表 3 所示。

表 3 测量结果误差与膜厚的关系

Table 3 Correlation among thickness, absolute error and relative error

序号	膜厚/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
1	0.00767	0.00108	14.1
2	0.04065	0.00091	2.2

由表 3 可以看出, 当全息干板膜厚度从 8 μm

增至 $41 \mu\text{m}$ 时,测量结果的绝对误差非常接近,且 $\leq 2 \mu\text{m}$,相对误差则从 14.1% 降到了 2.2% ,并随膜厚的增加明显降低。

4 结论

通过上述实验,测得 2 种全息干板膜的厚度分别为 $d_1 = (0.008 \pm 0.002) \text{mm}$ 和 $d_1' = (0.041 \pm 0.001) \text{mm}$ 。在此次测量中,虽然全息干板膜的折射率 n 为给定值,但因因子参与了误差的传递,使得测量结果合成不确定度与 n 呈类似反比关系,因此 n 也是影响测量结果误差的一个重要因素。由上述分析得出如下结论:(a)绝对误差随薄膜折射率的增加而减小;(b)当被测薄膜的折射率 n 在 1.5 左右时,用上述方法测量的绝对误差为 $2 \mu\text{m}$;(c)相对误差随着被测薄膜厚度的增加而减小。为保证测量结果的准确性,所测全息干板膜厚度应为 $40 \mu\text{m}$ 。另外,以上测量方法和结论在适当情况下也可用于测量附着在玻璃基底上的透明薄膜的厚度。

参考文献:

[1] 袁冬媛,徐富新.大学物理实验教程[M].长沙:中南大学出版社,2002:171-177.

- [2] 沈朝晖,王晶,马廷钧.用迈克尔逊干涉仪测量单层薄膜的厚度和折射率[J].大学物理实验,1994,7(1):1-3.
- [3] 徐兰珍.干涉膜厚度的研究[J].西安矿业学院学报,1998,18(4):386-389.
- [4] 宋敏,李波欣,郑亚茹.利用光学方法测量薄膜厚度的研究[J].光学技术,2004,30(1):103-106.
- [5] 沈伟东,刘旭,叶辉,等.确定薄膜厚度和光学常数的一种新方法[J].光学学报,2004,24(7):885-889.
- [6] 栾兰,闪辉,马秀芳,等.迈克尔逊干涉仪测平行玻璃板折射率的进一步研究[J].大学物理,2000,19(11):20-23.
- [7] BORISOV V I, KARPENKO A V. Using of the Michelson microwave interferometer for the measurement of permittivity of thin-layer materials [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2001,37(8):597-599.
- [8] 范素华,王培吉.激光干涉法测压电陶瓷的电常数 d_{31} [J].应用光学,1997,18(4):30-32.
- [9] 刘战存,徐克耀.利用透射光栅寻找迈克尔逊干涉仪的白光干涉条纹[J].物理实验,2004,24(7):35-36.
- [10] 任宇芬.反射式全息图和透射式全息图衍射机理研究[D].长沙:中南大学出版社,2005:26.

月球成为 21 世纪世界群雄展现实力的舞台

随着地球资源逐渐匮乏,开发利用月球资源已引起世界许多国家高度关注。在月球上建立永久性基地,其军事意义也不言而喻。更重要的是,对月球的探索与利用是一个国家战略威慑能力强弱的象征,对于提高民族自尊心和增强国家凝聚力具有重要意义。

据英国《星期日泰晤士报》3月19日报道,美国航天局正在制定一个“雄心勃勃”的登月计划,在2015年左右将宇航员送上月球背面,到2020年以前在月球上建立太空站。

美国重启的新登月计划将耗资约560亿美元。根据美国航天局的计划,2008年将发射探测器拍摄月球表面的照片,绘制出月球表面的三维地图;2010年发射无人登月舱,在月球背面登陆;同时还将发射通信卫星,组建登月互联网系统,保证宇航员在月球表面任何地点都可以和地球保持通信联系;宇航员登陆月球背面成功后,计划在5年的时间里每年运送2批宇航员登上月球,建立一个至少可维持20名美国军人7~9个月任务的永久性月球基地。

美国空军设想把导弹基地建在月球背面,使对手从地面观察不到,还可以从月球基地发射激光束摧毁地球周围的卫星。这比从地球上发射激光束干扰和摧毁卫星容易许多,因为月球没有大气干扰。

目前,世界许多国家如俄罗斯、中国、日本、印度、加拿大纷纷提出了自己的探月计划。包括法国、英国、德国、意大利、荷兰、西班牙等国在内的欧洲空间局计划在2020年前分4个阶段进行月球探测,最后将完成永久性月球基地建设。