

文章编号:1005-4642(2021)02-0027-06

利用光学干涉法测量液体薄膜特性

官子涵,潘玉寨

(哈尔滨工业大学(威海)光电科学系,山东 威海 264209)

摘要:将光学干涉的原理与色度学方法相结合,通过计算机编程实现由颜色的色调值到光程差的转换,实现白光干涉图的计算机模拟,通过查表比色法还原薄膜厚度信息.测试了该方法用于理想薄膜和实际液体薄膜的厚度分布信息,效果良好.该实验可在实验室内完成,也可居家完成,可用于光电信息相关专业实验项目和课程内容的扩展.

关键词:白光干涉;液体薄膜;还原比色法;图像处理

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.02.005

薄膜干涉现象最显著的特征是产生空间分布的干涉条纹,条纹的间距、周期、颜色、强度等信息反映了薄膜的干涉特性.随着计算机的广泛应用,数字图像处理已经被应用于干涉条纹图样的研究^[1-2].Brunning 等提出移相干涉术^[3],通过对多帧干涉图的分析实现了高精度的干涉测量,但该方法对仪器稳定性要求较高.Takeda 等提出了空间干涉条纹扫描和傅里叶变换分析的方法^[4].Bone 等提出了二维傅里叶变换处理干涉图的方法^[5],该方法可以通过单帧干涉图获得相位信息,但是算法较为复杂.

白光照明下,由于多波长干涉叠加会产生彩色图案,这种颜色属于结构色,它反映了薄膜干涉的相位以及光程差信息.Gustafsson 等利用 HIS 比色法实现了金属球与玻璃平板之间润滑油薄膜厚度的测量^[6].Hartl 等利用 CIELAB 色差方程比较干涉图和数字颜色图,确定油膜厚度,并且利用图像处理和计算机图形学技术,生成了高膜厚分辨率的三维薄膜形状网格曲面图^[7].

本文基于薄膜干涉以及色度学原理,通过计算机生成白光干涉图对白光干涉图样进行了分析,实现了查表比色法获得薄膜厚度信息并进行了误差分析.最后利用洗涤剂溶液,制备了液体薄膜,利用上述实验方法对液体薄膜的厚度分布

信息再现.

1 薄膜白光干涉原理与仿真分析

对于单层薄膜,基于薄膜干涉的双光束假设^[8].设 2 束光强度均为 I_0 ,可以得到干涉光强的表达式:

$$I=4I_0\cos^2\frac{\delta}{2}, \quad (1)$$

其中 δ 是相位差^[9].当薄膜两侧介质折射率小于薄膜折射率时,由于半波损失,2 束光间会出现附加相位差 π ,因此

$$\delta=\frac{2\pi}{\lambda}\Delta L+\pi, \quad (2)$$

式中 ΔL 为光程差.

如图 1 所示,设入射介质折射率为 n_0 ,薄膜折射率为 n_1 ,薄膜厚度为 d ,得到光程差表达式为:

$$\Delta L=n_1(AB+BC)-n_0(AD)=2n_1d\cos\theta_1. \quad (3)$$

人眼对于颜色的感知源自视网膜上 3 种视锥细胞,称为 L,M,S 型细胞.这 3 种视锥细胞的峰值灵敏波长分别负责对红、绿、蓝三色的响应,在计算机中这 3 种响应被存储为 R,G,B 值.根据格拉斯曼定律,这 3 种色光按一定比例混合可以得到任意颜色.

收稿日期:2020-08-17;修改日期:2020-11-29

基金项目:山东省教学创新计划项目(No.SDYC16002);哈工大教改项目(No.JGYJ-2019039)

作者简介:官子涵(1998-),男,山东烟台人,哈尔滨工业大学(威海)光电科学系 2021 级硕士研究生,研究方向为光学测量技术. E-mail:sdytguanzihan@163.com

通讯作者:潘玉寨(1976-),男,山东济宁人,哈尔滨工业大学(威海)光电科学系副教授,博士,研究方向为光学技术及应用. E-mail:panyz@hitwh.edu.cn



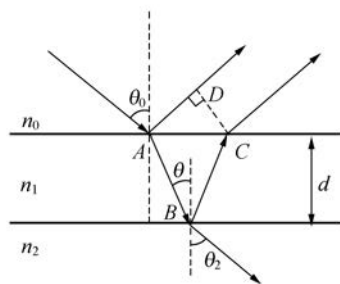


图 1 薄膜的双光束干涉示意图

RGB 值的计算公式为:

$$\begin{cases} R = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda, \\ G = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda, \\ B = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda, \end{cases} \quad (4)$$

其中, $I(\lambda)$ 为干涉场中的某波长处的光强分布. $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ 称为颜色匹配函数. 然而由于 3 种视锥细胞的敏感度取决于观察者并且颜色匹配函数 $\bar{r}(\lambda)$ 在部分波段出现负值, 不利于计算机处理, 因此国际照明协会 (CIE) 建立了与设备无关的标准色度系统——CIE XYZ 色度空间^[10]. XYZ 三刺激值的计算公式为^[11]

$$\begin{cases} X = \sum_t W(\lambda_t) \bar{x}(\lambda_t) I(\lambda_t), \\ Y = \sum_t W(\lambda_t) \bar{y}(\lambda_t) I(\lambda_t), \\ Z = \sum_t W(\lambda_t) \bar{z}(\lambda_t) I(\lambda_t), \end{cases} \quad (5)$$

其中, $W(\lambda_t)$ 为相对光谱功率分布函数, 它与采用的光源有关. 在居家实验中常利用自然光照明, 正午日光色温约为 5 000 K, 因此在本文中, 采用标准照明体 D50 作为仿真光源^[12], 在可见光波长范围内选取相邻波长间隔为 5 nm 的多波长单色光叠加进行仿真. 由于光强分布与光程差有关, 各波长光强叠加呈现出特定的颜色, 因而可以建立光程差与颜色的关系. 根据刘兆栋^[13] 和 Kato^[14] 等提出的方法, 将 XYZ 三刺激值转换到 RGB 空间, 可以实现计算机生成白光干涉图. 以光程差从左到右 0~4 000 nm 的情形为例, 得到如图 2 所示的白光干涉图以及相应的 RGB 值强度随光程差的变化曲线:

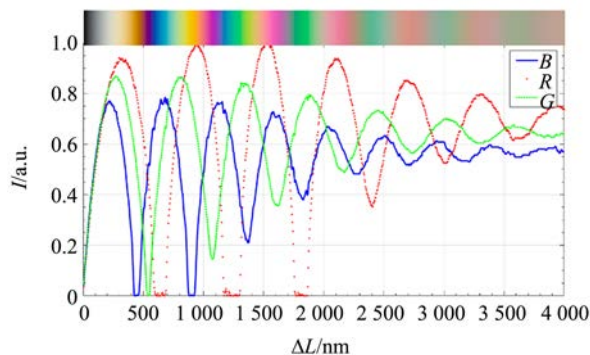


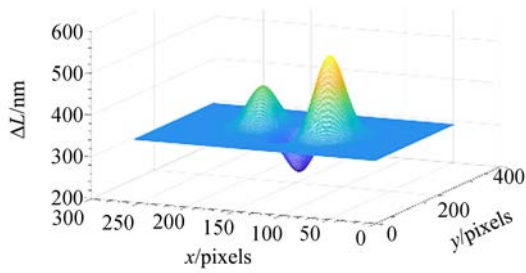
图 2 标准照明体 D50 照明下的白光干涉图及 RGB 曲线

可以看到, 由于平板上表面存在半波损失, 当光程差很小时, 对于短、中、长 3 个波段的光均发生相消干涉. 随着光程差的增加, B, G, R 的值是依次增大占据优势, 干涉色呈现周期性变化. 由于多波长的叠加, R, G, B 值的变化并不如式 (1) 描述呈幅度恒定的余弦平方方式变化, 而是发生了幅度的减小, 表现在干涉图中即为颜色条纹对比度的下降. 这是因为 R, G, B 值分别代表着敏感波段的响应, 当考虑波段的光强叠加时, 光强分布为

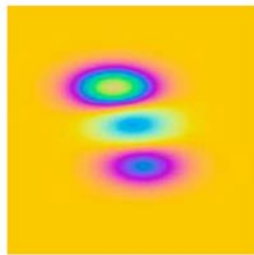
$$I = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \cos^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} \right) \Delta L d\lambda \approx \frac{1}{2} - \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)^2}{8\pi\Delta L(\lambda_2 - \lambda_1)} \sin \frac{\pi\Delta L(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_2\lambda_1} \cdot \cos \frac{\pi\Delta L(\lambda_2 + \lambda_1)}{\lambda_2\lambda_1}, \quad (6)$$

其中 λ_1 和 λ_2 分别为波段下界和上界, 通常间隔为 100 nm, ΔL 为光程差. 这里假设所有频率的光强度相同, 且探测器 (视锥细胞) 对该波段的光具有相同的吸收性. 可见, 随着光程差 ΔL 增大, 调制包络项趋近于 0, 光强趋于 1/2, 因而条纹对比度降低, 颜色趋近于均匀的灰色. 因此, 无法通过干涉颜色获得较厚薄膜的信息.

基于上述干涉图理论分析, 利用计算机仿真了厚度在 256~547 nm 不规则变化的薄膜模型, 其表面变化规律为高斯型 2 个突起和 1 个凹陷, 厚度变化的最大值为 197 nm, 最小为 -94 nm. 设薄膜折射率 $n=1.3$, 薄膜两侧为空气. 白光正入射, 以薄膜法线方向进行观察. 模拟得到了薄膜的白光干涉图, 如图 3 所示.



(a) 仿真薄膜表面面型



(b) 白光干涉图

图 3 不规则变化薄膜表面及其白光干涉图

2 查表比色法原理与分析

2.1 查表比色法原理

查表比色法的原理是利用光程差与干涉色的定量对应关系,建立对照表,通过取色查表得到测试点的光程差值。RGB 空间中,3 个分量均与色调、明度以及饱和度相关,因此当只对颜色进行分析时使用起来并不方便。A. R. Smith 在 1978 年根据颜色的直观特性创立了颜色空间,即 HSV 颜色空间^[15]。这是用圆锥体模型描述颜色的色彩空间,它将颜色的 3 个属性:色调(H)、饱和度(S)、明度(V)进行了分离。其中色调值反映了颜色最本质的信息,因此建立色调与光程差的关系就成为实现该方法的关键^[16]。

RGB 值到归一化 HSV 值的转换公式为^[17]

$$\begin{aligned}
 &V = \max(R, G, B), \\
 &S = \begin{cases} \frac{V - \min(R, G, B)}{V}, & V \neq 0; \\ 0, & V = 0. \end{cases} \\
 &360H = \begin{cases} 60(G - B) / [V - \min(R, G, B)], & V = R; \\ 120 + 60(B - R) / [V - \min(R, G, B)], & V = G; \\ 240 + 60(R - G) / [V - \min(R, G, B)], & V = B. \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

根据以上转换公式,得到光程差为 0~2 000 nm 时 HSV 值的变化曲线,如图 4 所示。

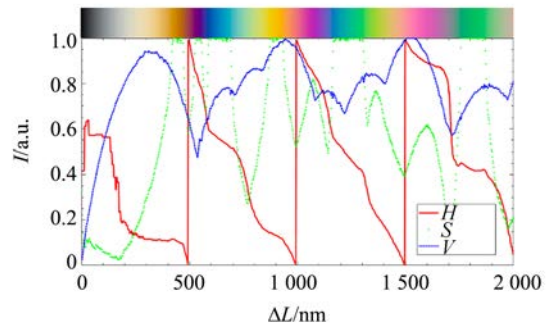


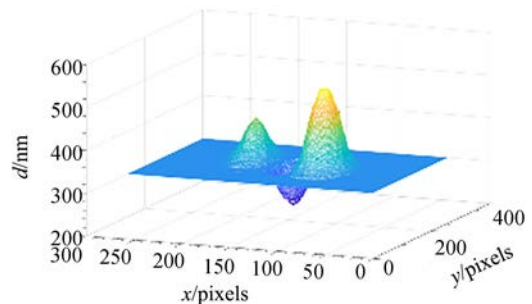
图 4 D50 照明下的 HSV 值与光程差关系曲线

可以从图 4 中看到色调值曲线存在明显的周期性,这与干涉图中呈现的颜色周期性变化的现象相符。在 0~490 nm, 1 460~1 960 nm 区间内,色调值与光程差相关性不佳,不适用于建立色调值与光程差的定量关系表格,因此选取 490~1 460 nm 区间,每隔 2 nm 取采样点,相邻点之间进行线性插值,建立色调与光程差的定量关系表。

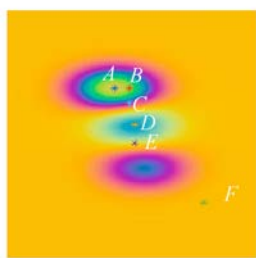
由于同色异谱效应的存在,不同光程差处可能具有相同的干涉色,这导致同一色调值可能对应区间内多个厚度值。解决这一问题的方法是在计算机自动还原某一位置处薄膜光程差之前先扫描其邻域内已还原点的光程差。对于光程差连续变化的模型,在候选的几个光程差数值中选取与邻域内点的光程差差值最小的候选值即可得到该点正确的光程差。

2.2 基于查表比色法的膜厚还原分析

将白光干涉图,即图 3(b)读入编写的比色查表程序,根据色调值对应的光程差通过式(3)求得相应的薄膜厚度,还原得到面型信息,如图 5 所示。



(a) 薄膜表面面型



(b)取点标记

图 5 比色法还原得到的薄膜表面面型

为了验证厚度的准确性,在薄膜不同位置处取 6 个点,分别标记为 A, B, C, D, E, F ,如图 5 (b)所示. 计算各点仿真薄膜厚度 d_0 与还原后实测薄膜厚度 d 的差值 Δ ,如表 1 所示.

表 1 各点的薄膜厚度值对比及相对偏差

标记点	d_0/nm	d/nm	Δ/nm	E_r
A	547.0	546.0	1.0	0.18%
B	520.5	520.3	0.2	0.04%
C	419.6	417.6	2.0	0.47%
D	256.3	258.4	2.1	0.82%
E	325.3	323.7	1.6	0.49%
F	350.0	351.9	1.9	0.54%

还原薄膜厚度过程中由计算机处理带来的偏差在 1% 以下. 在其他测量薄膜厚度的方法中,薛晖等人^[18]基于频域白光干涉以及光纤光谱仪的方法对厚度在 137.2~461.1 nm 的 4 个样品进行测量,与传统光度法相比较的测量偏差在 1 nm 以内;帅高龙等^[19]基于二维傅里叶变换法对厚度为 96.14 nm 的薄膜台阶进行测量,与 ZYGO 干涉仪测量的结果相比,偏差为 0.22 nm. 可以看出,本文采用的方法理论上可以在常见仪器和简单算法条件下实现与其他方法相媲美的精度.

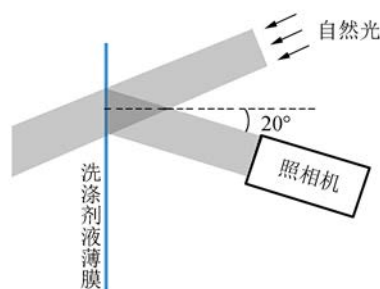
根据 Gustafsson 利用 HIS 比色法对润滑油膜的实验测量结果^[6],该方法在实际测量中与理想油膜形状的偏差在 6% 以下. 实际测量中的误差可能与显微镜成像时产生的畸变、尘埃颗粒的影响以及标定过程中产生的误差等有关.

3 薄膜厚度还原实验

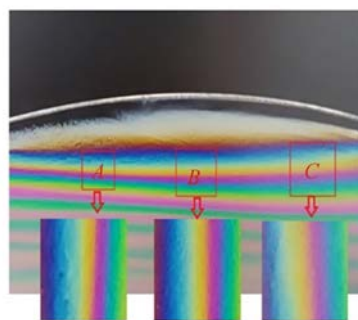
由于没有液膜厚度的商售测量仪器,无法研究与现有仪器的测量误差. 为了进一步验证本文方法的精度和可靠性. 制备了已知特性的液体薄

膜,从其白光干涉图中获得光程差分布,进而实现薄膜厚度分布测量实验,并与文献报道结果进行了对比研究.

实验采用立白家用洗涤剂与水以 1:50 的比例进行混合,洗涤剂的主要成份是软化水和表面活性剂. 在自然光照明下,利用相机拍摄得到竖立金属圈内洗涤剂液体薄膜的干涉图像,薄膜两侧为空气,如图 6 所示. 采用普通相机拍摄该干涉条纹图,相机方向与薄膜法线夹角约为 20° . 截取图中红框内部分,逆时针旋转 90° 得到测试用图[图 6(b)中所示],为了得到一致的颜色区间,实验中取 A, B, C 处尺寸分别为 208×208 , 256×256 , 279×279 . 利用 D50 光源仿真建立参考白光干涉图. 考虑入射光为 20° 的影响,将图 6 (b)中所取的 A, B, C 外输入编写的查表比色程序中,得到 A, B, C 处还原出来的光程差分布信息,如图 7 所示.



(a)测量装置示意图

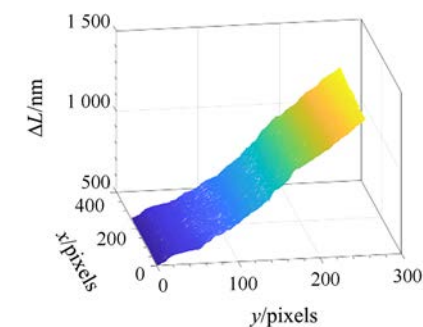


(b)白光干涉图

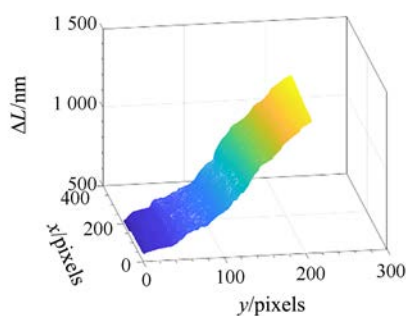
图 6 洗涤剂薄膜的白光干涉装置及干涉图

还原得到的光程差在 500~1 400 nm 区间内. 对于可见光波段,常温(25°C)下该洗涤剂溶液的折射率与水的折射率相当,约为 1.34^[20-21]. 由式(3)可以求得 3 处液膜厚度在 193~540 nm 之间,即在亚微米量级,与文献报告一致^[22]. 竖

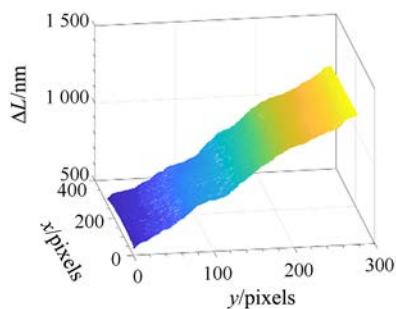
立洗涤剂溶液薄膜在即将破裂时厚度分布由楔形变化成漏斗形。由于实验用金属圈的不对称,实际上 A, B 处下方有更多的肥皂液产生拉力,因而薄膜横截面形状更接近漏斗形,而 C 处接近金属圈边缘并且受下方肥皂液拉力影响小,薄膜形状更接近楔形或铃铛形。可见,该方法在实际干涉图测试中也能有比较好的效果,能够真实地表征薄膜厚度特性。



(a) A 位置



(b) B 位置



(c) C 位置

图 7 还原得到的光程差分布

进一步地,将该方法转换为实时处理干涉图程序并实现界面显示,可以实时监测薄膜厚度变化,对于研究薄膜厚度变化规律及膜内分子动力

学过程是一种简单的非接触式测量手段。

4 结 论

基于薄膜光学干涉原理和色度学原理,理论分析和仿真模拟了白光干涉图,通过数字图像处理建立了颜色与光程差的对应关系,实现了查表比色法的计算机仿真,并且测试了该方法用于理想薄膜和实际液体薄膜的厚度分布信息的测量实验,总体效果良好。490~1 460 nm 之间光程差的测量,结果显示由图像处理过程产生的误差在 0.5% 以下,在实际的测量过程中,因文中提到的各种因素可能会使得平面上各点光程差的误差大于该值。结合文献结果对比分析,该方法实际误差在合理范围内,可以用于实际薄膜厚度形状和分布的测量分析。

参考文献:

- [1] 黄和,王亮星,李俊洋,等. 利用激光干涉测量流体的二维温度场分布[J]. 物理实验,2019,39(5):37-41,46.
- [2] 罗劲明,薛凌峰,郑景辉,等. 空气折射率梯度分布的可视化实验[J]. 物理实验,2018,38(1):19-21,28.
- [3] Brunning J H, Herriott D R, Gallagher J E, et al. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses [J]. Applied Optics, 1974,13(11):2693-2703.
- [4] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. Journal of the Optical Society of America, 1982,72(1):156-160.
- [5] Bone D J, Bachor H A, Sandeman. Fringe-pattern analysis using a 2-D Fourier transform [J]. Applied Optics, 1986,25(10):1653-1660.
- [6] Gustafsson L, Höglund E, Marklund O. Measuring lubricant film thickness with image analysis [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J: Journal of Engineering Tribology, 2015,208(3):199-205.
- [7] Hartl M, Krupka I, Liška M. Differential colorimetry: tool for evaluation of chromatic interference patterns [J]. Proceedings of SPIE; The International Society for Optical Engineering, 1997,36(9):2384-2391.

- [8] Atkins L J, Elliott R C. Investigating thin film interference with a digital camera [J]. *American Journal of Physics*, 2010, 78(12):1248-1253.
- [9] 马晓航,熊畅,陈楷东,等. 利用白光的双缝干涉测量介质薄膜的折射率[J]. *物理实验*, 2016, 36(8): 35-38.
- [10] 叶春芳,刘王玲,余飞鸿. CIE 色度空间的控件实现[J]. *光学仪器*, 2005, 27(3):27-32.
- [11] Montarou C C, Gaylord T K, Villalaz R A, et al. Colorimetry-based retardation measurement method with white-light interference [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(25):5290-5297.
- [12] 高维惜,倪凯凯,林泽文,等. LED 模拟太阳光研究[J]. *照明工程学报*, 2015, 26(1):80-83.
- [13] 刘兆栋,边疆,王军,等. 白光干涉色的计算机仿真及应用[J]. *中国激光*, 2010, 37(11):303-307.
- [14] Kato T. A method to synthesize interference color chart with personal computer [J]. *Journal of the Geological Society of Japan*, 2001, 107(1):64-67.
- [15] Smith A R. Color gamut transform pairs [J]. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1978, 12(3):12-19.
- [16] 王莘. 基于白光干涉色的光学材料应力定量测量的方法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2011.
- [17] Gonzalez R, Woods R, Eddins S. 数字图像处理 (MATLAB 版)[M]. 阮秋琦,译. 北京:电子工业出版社, 2005:217-243.
- [18] 薛晖,沈伟东,顾培夫,等. 基于白光干涉的光学薄膜物理厚度测量方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1877-1880.
- [19] 帅高龙,苏俊宏,杨利红,等. 基于 FFT 的薄膜厚度干涉测量新方法[J]. *光学与光电技术*, 2009, 7(1):55-57.
- [20] Hale G M, Querry M R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μm wavelength region [J]. *Applied Optics*, 1973, 12(3):555-563.
- [21] 林春丹,杨冠,焦梦瑶,等. 基于迈克耳孙干涉仪及劈尖测量透明液体折射率[J]. *物理实验*, 2016, 36(8):13-15, 20.
- [22] 高华,孙书洋,刘强,等. 干涉法探究竖直面内肥皂膜膜厚的分布规律[J]. *中国现代教育装备*, 2014(1):65-66.

Liquid thin films measurement based on optical interference

GUAN Zi-han, PAN Yu-zhai

(Department of Optoelectronic Science, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: The principle of optical interference was combined with colorimetric method to realize the conversion from the hue value of color to the optical path difference by computer programming and simulation of white light interferogram. By this method, the film thickness information of idea thin film and actual liquid film were restored. The experiment could be completed in the laboratory or at home and could be used to expand the experimental projects and course contents of photoelectric information related majors.

Key words: white light interference; liquid film; reductive colorimetry; image processing

[责任编辑:郭 伟]