

文章编号: 0253-2239(2009)07-1877-04

基于白光干涉的光学薄膜物理厚度测量方法

薛 晖 沈伟东 顾培夫 罗震岳 刘 旭 章岳光

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 设计了一套利用白光干涉理论测量薄膜厚度的系统, 主要包括迈克耳孙白光干涉系统和光纤光谱仪。对干涉信号进行频域分析, 结合拟合测试与理论能量曲线的方法并选择合适的目标函数, 进一步精确反演得到待测薄膜样品的物理厚度, 使用上述方法对多组不同厚度的薄膜样品进行计算, 并对结果进行了详细的精度及误差分析。将本实验装置测试所得到的数据与传统的光度法相比较, 结果表明使用该测试方法测量光学薄膜物理厚度的误差可以小于 1 nm。与传统的光度法和椭偏法相比, 提供了一种测量光学薄膜厚度的较为简单、快速的解决方案, 同时保证了较高的精度。

关键词 白光干涉; 测量薄膜物理厚度; 等效厚度; 频域分析

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092907.1877

Thickness Measurement of Thin Film Based on White-Light Spectral Interferometry

Xue Hui Shen Weidong Gu Peifu Luo Zhenyue Liu Xu Zhang Yueguang

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A new method of measuring thickness of optical thin film with dispersive white-light spectral interferometry is proposed. By analyzing the recorded interference spectrum in the frequency domain and fitting the recorded channel spectrum to the theoretical value, the thin-film thickness can be determined. The thicknesses of several different thin film samples are calculated and the results show that this method can reach high precision with the error less than 1 nm. The new method can provide a simple and fast solution in calculating thickness of optical thin films, compared with traditional spectrophotometric and ellipsometric method, while still maintaining high accuracy.

Key words white light interference; thickness of optical thin film; effective thickness; frequency domain analysis

1 引 言

随着信息产业的发展, 光学薄膜的需求不断增大, 对器件特性的要求也越来越高。物理厚度是薄膜最基本的参数之一, 它会影响整个器件的最终性能, 因此快速而精确地测量薄膜厚度具有重要的意义^[1~4]。台阶仪是常用的厚度测试方法^[5], 然而它需要在样品上制作台阶, 同时测试中机械探针与样品接触, 会对一些软膜的表面造成损伤, 因而非破坏的光学手段是更为理想的方法。传统的测量薄膜物理厚度的光学方法主要有光度法和椭偏法两种。其中光度法是通过拟合分光光度计测得的透/反射率曲线来得到光学薄膜厚度的一种方法, 但它要求膜

层较厚以产生一定的干涉振荡并且只能测量弱吸收膜; 椭偏仪测量具有灵敏度高的优点, 但是受界面层等因素的影响, 需要复杂的数学模型来求解厚度^[6]。上述这些方法已经成功而广泛地应用在各个领域, 然而随着近年来微光机电系统等微加工技术的发展, 经常需要在高低起伏的基板上 (Patterned substrate) 沉积薄膜, 因此用测量表面轮廓的白光干涉仪来进行薄膜厚度测试的方法引起了人们的关注。Kim SW 报道了偏振分束的双光路干涉系统测量薄膜厚度^[3], 而 Hlubina P 则通过拟合迈克耳孙干涉仪测试得到的薄膜反射相位来确定厚度^[7]。

本文提出了一种基于频域白光干涉理论, 利用

收稿日期: 2008-10-07; 收到修改稿日期: 2008-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(60708013, 60778025)资助课题。

作者简介: 薛 晖(1981-), 男, 博士研究生, 主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: adongszju@hotmail.com

导师简介: 顾培夫(1944-), 男, 教授, 主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: gupeifu@zju.edu.cn

迈克耳孙白光干涉系统和光纤光谱仪测量光学薄膜物理厚度的方法。在实际测量过程中,对于非平衡的迈克耳孙白光干涉系统,引入了等效厚度 T_{ef} 参量。光谱仪测量的干涉强度信号中,包含了空气光程差 L 、分束镜等效厚度 T_{ef} 和薄膜反射位相信息,因此将理论光谱值拟合测量值,就可以获得薄膜的厚度。采用这种方法测试了采用电子束蒸发得到的一组不同厚度的 TiO_2 薄膜,同传统光度法的测试结果比较,两者之间偏差小于 1%,而且无论是测量还是后继数据处理都要快得多。

2 测量原理及实验装置

从传统的相干理论来看,使用白光作为光源的干涉仪相干长度非常短,一般只有几微米。但当距离增大时,仍然可以在光纤光谱仪上测得对比度很

好的干涉条纹。这种由于光束叠加造成谱密度的周期性变化称为空间频域相干,以有别于经典的空间时域相干。这种现象的原因主要是由于光纤光谱仪中光栅的分光作用会产生窄带光谱,也就是说频域干涉将宽带光场转变为窄带光场^[8-11]。测量光路中采用光纤光谱仪做接收器,这样既可以利用到白光干涉的精度,同时还可以获得比较大的量程。

实验装置为图 1 所示的迈克耳孙干涉系统,包括白光光源(一般为卤钨灯),准直透镜,50/50 的分光棱镜(材料为 BK7),两组微位移器(分别与干涉系统的两臂连接)和光纤光谱仪。选用的是 Ocean Optics 的 USB4000 型光纤光谱仪,其工作范围为 200~1100 nm,采用 600 线对、闪耀波长为 500 nm 的光栅作为色散器件^[12]。

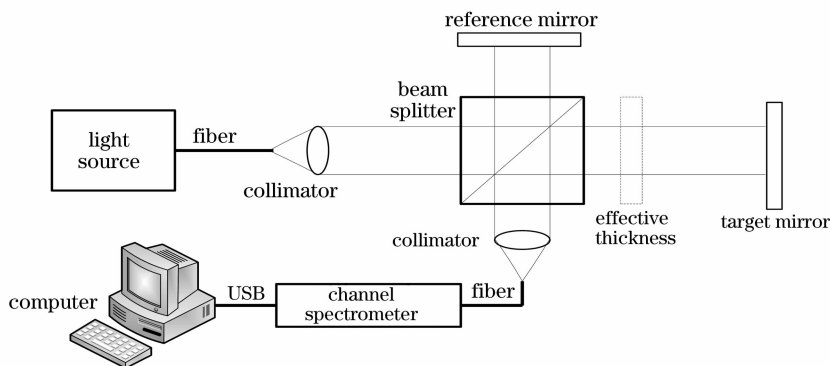


图 1 实验装置图,迈克耳孙干涉系统的其中一端放置待测薄膜样品

Fig. 1 Experimental set-up with a thin film sample on the target arm of a Michelson interferometer

光源 S 发出的光线经由准直透镜 Z_1 准直后入射到分光棱镜 BS 中;光线经由分光棱镜 BS 分成两束,一束入射至参考镜,另一束入射至待测样品。参考镜镀铝膜,其相位可忽略不计。两束光线经过反射再次通过分光棱镜 BS 后发生干涉,最后耦合进光纤 F_2 并被 USB4000 光纤光谱仪接收。在实际的非平衡迈克耳孙干涉系统中,由于制作工艺等原因会造成分光棱镜的非对称,从而导致分光棱镜两侧的几何厚度不一致。为此,将非对称的分光棱镜等效替换成理想的对称的分光棱镜和一块相同材料的厚度为 T_{ef} 的平板。对于具有高斯函数响应特性的光纤光谱仪,其具体接收到的干涉信号可以表示为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \left\{ 1 + V(\lambda) \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \Delta(\lambda) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 $I_0(\lambda)$ 为背景光谱, $V(\lambda)$ 为干涉强度。 $\Delta(\lambda)$ 为干涉系统两臂的光程差,可以表示为

$$\Delta(\lambda) = 2L + 2n_{\text{bs}}(\lambda) T_{\text{ef}} - \frac{\delta(\lambda)}{2\pi}, \quad (2)$$

式中 $2L$ 表示光路在两臂间空气中传播的光程差, T_{ef} 表示分光棱镜的等效厚度, n_{bs} 表示其折射率, δ 表示由薄膜内部多次反射引起的非线性相位。其中 (1) 式又可以表示为

$$I(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \cos[\varphi(\lambda)] = a(\lambda) + \frac{1}{2} b(\lambda) \exp[i\varphi(\lambda)] + \frac{1}{2} b^*(\lambda) \exp[-i\varphi(\lambda)], \quad (3)$$

式中 $a(\lambda)$ 和 $b(\lambda)$ 分别表示背景光谱与干涉包络,可以通过傅里叶变换及反变换求得。 $\varphi(\lambda)$ 表示干涉系统两臂间的相位差,可用公式表示为

$$\varphi(\lambda) = \frac{\Delta(\lambda)}{\lambda} \times 2\pi = \frac{[2L + 2n_{\text{bs}}(\lambda) T_{\text{ef}} + \delta(\lambda)]}{\lambda} \times 2\pi. \quad (4)$$

现假设待测样品为单层膜,则 (4) 式中的由薄膜多次反射引起非线性相位 $\delta(\lambda)$ 可由下式表示

$$\delta(\lambda, d) = \text{Angle} \left[\frac{r_{01} + r_{12} \exp(-i2\beta)}{1 + r_{01} r_{12} \exp(-i2\beta)} \right], \quad (5)$$

式中 r_{01} 和 r_{12} 分别为薄膜上下表面的菲涅耳反射系数, β 为光的相位变化, 可由下式表示:

$$\beta = 2\pi n(\lambda) d \cos \theta / \lambda, \quad (6)$$

式中 $n(\lambda)$ 和 d 分别为待测薄膜的折射率和物理厚度, θ 为光线的入射角。为了获得待测薄膜的物理厚度 d , 定义如下的评价函数

$$X^2(L, T_{\text{ef}}, d) = \sum_{i=1}^N [I(\lambda_i, L, T_{\text{ef}}, d) - I^e(\lambda_i)]^2. \quad (7)$$

由(7)式可以计算出了当 L, T_{ef} 和 d 为何值时, 拟合曲线与实测曲线具有最大的相似度。用 Levenberg-Marquardt 最小均方算法拟合理论值 I 与实测值 I^e , 使得目标函数 X 最小, 进而求解出待测薄膜的物理厚度 d 。

3 实 验

在清洗干净的玻璃基板上采用电子束蒸发的方法制备不同厚度的 TiO_2 薄膜作为待测样品进行实验。干涉系统中分光棱镜与薄膜基板材料都采用 BK7。为了提高拟合的效率, 采用如下所述方法事先确定(7)式中 L 与 T_{ef} 的初始值。将如图 1 所示的迈克耳孙干涉系统的两臂都换上特性相同镀铝反射镜。调节整个干涉系统使得干涉条纹最为清晰, 一般保证在整个周期内有 8~10 个干涉峰值为最佳。此时干涉系统所接收到的信号如(1)式所示。由于两臂所放置的镀铝反射镜之间相位差可以忽略不计, 所以此时两臂间的光程差(OPD)则由(2)式中等于号右边的前两项构成, 即

$$\Delta(\lambda) = 2L + 2n_{\text{bs}}(\lambda) T_{\text{ef}}, \quad (8)$$

式中 n_{bs} 表示 BK7 的折射率, 可以采用 Sellmeier 色散关系式计算, 具体参数可查手册。由于两臂间金属反射镜相位差忽略不计, 所以此时定义的目标函数可表示为

$$X^2(L, T_{\text{ef}}) = \sum_{i=1}^N [I(\lambda_i, L, T_{\text{ef}}) - I^e(\lambda_i)]^2. \quad (9)$$

拟合实际测量曲线及理论拟合曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出两条曲线具有很好的吻合度。因此可以确定在此条件下的 T'_{ef} 和 L' 。

将干涉系统其中一臂的金属反射镜换成待测薄膜样品, 使用(7)式对实际测试信号进行拟合。虽然更换样品前后 T_{ef} 和 L 有略微变化但步骤一所得的结果 T'_{ef} 和 L' 仍可以作为优化的初始值, 这样可以

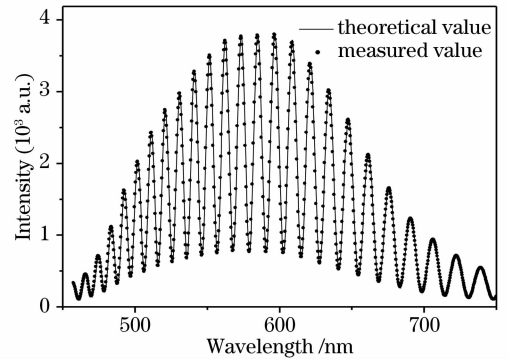


图 2 当干涉系统两臂均为特性相同的金属反射镜时, 实测曲线与理论计算得到的曲线的比较

Fig. 2 Comparison of measured and calculated spectral interferogram for two identical metallic reflective mirrors

有效提高拟合效率。在本实验中, (6)式中的 $n(\lambda)$ 表示 TiO_2 的折射率, 其值可以事先通过材料实验由光度法确定。

图 3 为干涉系统其中一臂的反射镜被换成不同物理厚度的 TiO_2 薄膜样品后的理论光谱与实测光谱(拟合波段为 450~750 nm), 可以看出, 两者具有较好的吻合度。根据(10)式计算 T_{ef} 所得的结果为 $-118.17 \mu\text{m}$, 负号表示图 1 中的等效平板的实际位置在干涉系统的另一端。从图 3(a)和图 2 的比较中还可以比较明显的看出, 由于加入了薄膜的多次反射效果引起的干涉可见度的变化。从图 3(d)与图 3(b)的比较中也可以明显地看出, 由于薄膜厚度的增加, 干涉效应趋于更加明显。使用了传统的光度法对待测样品的透过率曲线进行分析计算, 并加以对比, 两者所得的厚度误差小于 1 nm, 结果如表 1 所示。由表 1 可以看出, 本测试方法的测试精度与所测薄膜的物理厚度有一定关系, 厚度最小的一号样品的误差最大, 而厚度最大的四号样品误差最小, 因此本方法更适合测量厚度较大、干涉较明显的薄膜样品。

表 1 不同厚度薄膜样品的测试结果以及与光度法的比较
Table 1 Results of thin film of different thickness compared with those by spectrophotometer

Names of samples under test	Measured Thickness using photometric method /nm	Measured thickness using white-light interferometric method /nm
Sample 1	137.2	137.9
Sample 2	264.5	264.8
Sample 3	345.7	346.1
Sample 4	461.1	461.3

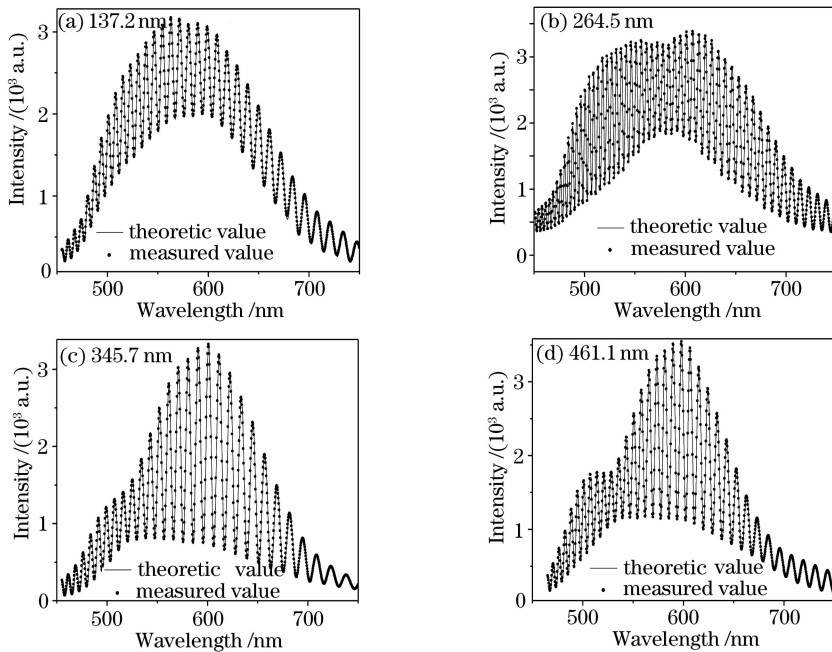


图3 干涉系统的一端放置不同厚度的薄膜样品时,理论曲线与实测曲线的比较

Fig. 3 Comparison of measured and calculated (solid curve) spectral interferogram when a mirror is replaced by thin film of different thickness

4 结 论

提出了一种基于白光干涉理论的测量光学薄膜物理厚度的方法。借助于直接拟合能量曲线的方法,可以精确的测量待测薄膜样品的物理厚度。接收端采用光纤光谱仪,整个测量及检测过程十分快速,只需几分钟。本系统若加以改进,完全有可能应用于膜厚实时监控或薄膜均匀性测量。

参 考 文 献

- 1 A. V. Tikhonravov, P. W. Baumeister, K. V. Popov. Phase properties of multilayers[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(19): 4391
- 2 J. Schwider, L. Zhou. Dispersive interferometric profilometer [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**: 995~997
- 3 Ki-Nam Joo, Seung-Woo Kim. Thin-film thickness profile and its refractive index measurements by dispersive white-light interferometry [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24): 11885~11891
- 4 L. M. Smith, C. C. Dobson. Absolute displacement measurement using modulation of the spectrum of white light in a Michelson interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**: 3339~3342
- 5 http://www.veeco.com/pdfs/appnotes/AN542_Dektak_Vision_Final_447.pdf
- 6 S. A. Henck, W. M. Duncan, L. M. Lowenstein *et al.*. In situ spectral ellipsometry for real-time thickness measurement: Etching multilayer stacks[J]. *J. Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1993, **11**: 1179~1185
- 7 P. Hlubina. Dispersive white-light spectra linterferometry with

absolute phase retrieval to measure thin film[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(17): 7678~7685

- 8 Young-Sik Ghim, Seung-Woo Kim. Dispersive white-light interferometry for thin-film thickness profile measurement[C]. *SPIE*, 2005, **5856**: 419~426
- 9 http://www.veeco.com/pdfs/appnotes/an47_interferometry_21.pdf
- 10 K. Naganuma, K. Mogi, H. Yamada. Group-delay measurement using the Fourier transform of an interferometric cross correlation generated by white light[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(17): 393~397
- 11 Ki-Nam Joo, Seung-Woo Kim. Refractive index measurement by spectrally resolved interferometry using a femtosecond pulse laser [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(6): 647~649
- 12 <http://www.oceanoptics.com/>
- 13 Jiang Yi, Cao Zhuangqi, Shen Qishun *et al.*. Determination of the complex dielectric coefficient and thickness of absorbing films using guided waves[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 642~646
- 蒋毅,曹庄琪,沈启舜等. 导波法测量吸收薄膜的复介电系数和厚度[J]. *光学学报*, 2000, **20**(5): 642~646
- 14 Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yueguang *et al.*. Refractive indexes of oxidized thin films deposited by ion beam sputtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 290~293
- 顾培夫,李海峰,章岳光等. 用离子束溅射淀积的氧化物薄膜的折射率[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 290~293
- 15 Li Maohe, Zhang Meidun. Refractive index measured by optical fiber Michelson interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 1294~1296
- 李毛和,张美敦. 用光纤迈克耳孙干涉仪测量折射率[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9): 1294~1296