

超外差光学膜厚的精密测量

林 跃 周志尧 王润文

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文用纵向塞曼双频稳频 He-Ne 激光器作光源, 采用光学超外差技术与相位高精度测量相结合, 测量光学膜厚。测量灵敏度为 0.1nm 量级。实验结果与理论分析相符合, 并与其它测量方法的测量结果进行了比较。

Opto-heterodyne measurement of thickness of coated films

Lin Yao, Zhou Zhiyao, Wang Runwen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: Thickness measurement of the coated film is put forward which combines the opto-heterodyne technique and the precise phase interferometry. Its thickness measurement sensitivity is of the order of 0.1nm level. The experimental results conform to the theoretical analyses. Comparison with other instruments is also given.

一、引 言

光学薄膜业已在光谱学、激光及空间技术等领域内得到了重要的应用。但是, 薄膜技术的进一步发展依赖于薄膜微观结构和其光学性质的关系, 因此, 除了进行薄膜结构分析外, 精确测定薄膜的光学参数有着十分重要的意义。测定介质薄膜厚度的干涉显微镜法、多光束干涉法、X 射线荧光法等^[1~4], 已逐渐得到应用。但目前, 具有较高测量精度的仍然是椭圆偏振法(薄膜测量灵敏度可达 1nm 量级)^[5]。但它的测量精度的进一步提高, 受到较多因素的限制, 如椭圆偏振仪中起偏器和检偏器度盘的精度, 以及 1/4 波片的

相位延迟精度等。

本文用光学超外差方法, 采用分偏振干涉结构和相位精密测量相配合, 非接触测量光学膜厚。此方法与其他膜厚测量方法相比, 具有结构紧凑、测量方便和灵敏度高等优点。

二、实验原理

系统的实验原理如图 1 所示。由纵向塞曼双频稳频激光器(Z)输出两束频率分别为 f_+ 、 f_- 的左、右旋圆偏振共程光束, 经 1/4 波片后成为两互相垂直的线偏振共程光束^[6]。然后由分束器分成二束, 一束照射到偏振轴

收稿日期: 1987 年 7 月 1 日。

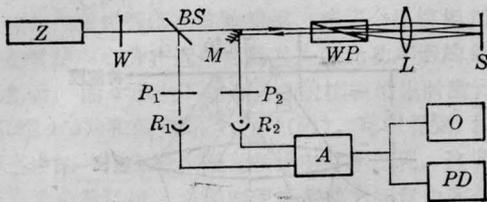


图1 实验原理

Z—塞曼稳频 He-Ne 激光器; W—1/4 波片;
BS—分束器; M—平面镜; WP—渥拉斯顿
棱镜; L—透镜; S—待测物; P₁、P₂—
偏振器; R₁、R₂—检测器; A—放大器;
O—示波器; PD—相位计

与两线偏振光互成 45° 的偏振器上, 两线偏振光发生干涉, 在光电检测器上即可接收到一个差频信号, 此信号经放大器放大后作为系统的参考信号而显示在示波器上。另一束光为测量光束, 照射在渥拉斯顿棱镜上^[7], 分成两束频率分别为 f_+ 、 f_- , 互相垂直的线偏振光束, 由透镜聚焦在待测膜表面上两点。两反射光束经透镜和渥拉斯顿棱镜后, 重新组合成一束与入射光平行的两线偏振光的共程光束。经平面镜反射到偏振轴与两线偏振光互成 45° 的偏振器上, 发生干涉, 由光电检测器接收。在示波器上即可得到一个包含待测膜表面信息的差频信号。由于光束在不同介质上的反射特性不同, 因此, 测量前应先 在待测膜上敷上一层不透明的银(铝)膜, 然后, 两聚焦光点沿平行于两光点的连线方向, 垂直扫描待测膜层边缘(如图 2)。当一个光点进入待测膜上时, 测量光束中两分光束的光程差值出现一个大的增量, 于是在示波器上便得到一个包含待测膜层厚度特性的差频信号。比较测量信号和参考信号相位差的变化情况 $\Delta\phi$, 即可发现此时的 $\Delta\phi$ 有一个大的增量。当另一个光点也进入待测膜上时, 测量信号和参考信号的相位差值会减小, 恢复到第一个光点进入待测膜前的初始值。由此, 根据信号相位差的阶跃变化值, 即可知待测膜层的厚度。

由于选用纵向塞曼双频稳频激光器作光

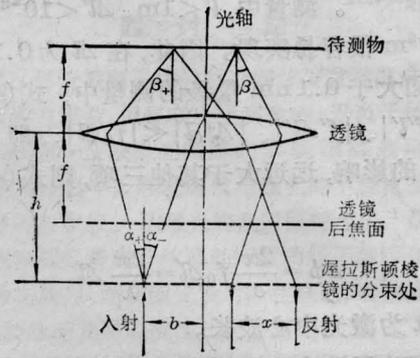


图2 干涉仪的干涉光路($h \neq f$)

b —入射光束中心到透镜光轴的距离; α_+ 、 α_- —
Wollaston 棱镜的分束角; f —透镜焦距;
 H —待测膜厚度; h —入射光分束处到
透镜的距离

源, 则光电检测器 (R_1)、(R_2) 上的光场可表示为^[8]:

$$E = E_+ + E_- = \exp[i(k_+ Z_+ - \omega_+ t)] + \exp[i(k_- Z_- - \omega_- t)] \quad (1)$$

其中 k 是波数, ω 是角频率, Z 是光程, “+”和“-”表示左、右旋圆偏振光。由于光电检测器接收到的光强信号 $I \propto |E|^2$, 则比较测量信号和参考信号, 即可得出它们的相位差 ϕ :

$$\phi = (k_+ - k_-)(Z_m - Z_r) + (k_+ + k_-) \frac{1}{2} l \quad (2)$$

其中 Z_m 、 Z_r 是测量光束和参考光束的平均光程, l 是测量光束中左、右旋圆偏振光的光程差。由于

$$k_+ - k_- = (2\pi/c)(f_+ - f_-) = (2\pi/c)f', \\ (k_+ + k_-)/2 = (\pi/c)(f_+ + f_-) = (2\pi/c)f_0, \\ Z_m - Z_r = l'$$

(其中 f_0 是激光原子谱线的中心频率, l' 是测量光束和参考光束的平均光程之差), 则

$$\phi = (2\pi/c)(f'l' + f_0 l) \quad (3)$$

测量光束与参考光束的相位差变化 $\Delta\phi$:

$$\Delta\phi = (2\pi/c)(\Delta f'l' + f'\Delta l' + \Delta f_0 l + f_0 \Delta l) \quad (4)$$

对频差为 10^6 Hz 量级的塞曼稳频 He-Ne 激光器, $\Delta f' < 10^3$ Hz, $f_0 > 4 \times 10^{14}$ Hz, $\Delta f_0 <$

$10^6 \text{ Hz}^{[8\sim 11]}$ 。测量中, $l' < 1\text{m}$, $\Delta l' < 10^{-3}\text{m}$, $l < 10^{-5}\text{m}$ 很容易实现。因此, 在 Δl 为 0.1nm 量级和大于 0.1nm 量级的测量中, 式(4)中的 $|df'V|$ 、 $|f'\Delta l'|$ 、 $|\Delta f_0 l| \ll |f_0 \Delta l|$, 即 $f_0 \Delta l$ 对 $\Delta\phi$ 的影响, 远远大于其他三项, 则式(4)可写作:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{c} f_0 \Delta l = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l \quad (5)$$

其中 λ 为激光中心波长。

实验干涉光路如图 3。入射光束经渥拉斯顿棱镜后, 分成光束 1、2, 由透镜聚焦在待测膜表面上二点。当入射光束的分束点不在透镜后焦面上时, 光束 1、2 在待测膜表面上的两反射光束, 经过透镜和渥拉斯顿棱镜后, 虽互相平行, 但不完全重合。由几何光学原理易求得它们的间距为:

$$x = 2(h-f)(\text{tg } \alpha_+ + \text{tg } \alpha_-) \quad (6)$$

其中 f 为透镜焦距, h 为入射光束的分束点到透镜的距离, α_+ 、 α_- 分别为两线偏振光的分束角, 由式(6)可得: h 和 f 的差值越大, x 越大, 即两反射光束越不重合。当 h 和 f 的差值足够大时, 两反射光束则完全分开。光电检测器不能同时接受到两偏振光束, 因而亦无测量信号输出。因此, 测量时, 应使入射光束的分束点处在透镜后焦面上, 即 $h=b$, 使两反射光束尽可能重合, 减小测量误差。

当 $h=f$ 时, 两反射光束完全重合。由几何光学原理易得到:

$$\text{tg } \beta_+ = \text{tg } \beta_- = \text{tg } \beta = b/f \quad (7)$$

其中 β_+ 、 β_- 为光束 1、2 入射在待测膜表面上的入射角, b 为入射光束中心到透镜光轴的距离。此时, 入射光束和反射光束相对于透镜光轴完全对称, 则它们的间距为 $2b$ 。

当入射光束在渥拉斯顿棱镜中的分束点处在透镜后焦面上, 且待测膜膜厚 H 小于透

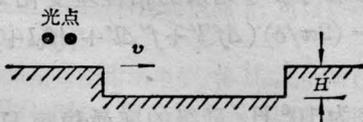


图 3 光学膜的扫描测量

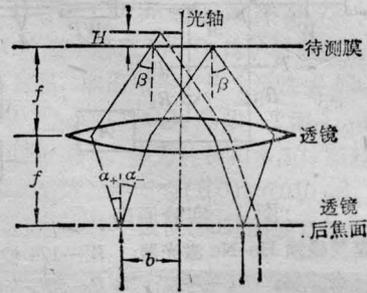


图 4 干涉仪的干涉光路($h=f$) (条件同图 2)

镜焦深的情况下, 光束 1、1' 的反射光相互平行, 则光束 1'、2 的光程差 l' 与光束 1、2 的光程差 l 的差值 Δl , 由几何光学原理易得到:

$$\Delta l = l' - l = 2H \cos \beta \quad (8)$$

其中 H 为待测膜膜厚。由于 b 相对于透镜焦距仅仅是个量, 即 $b \ll f$, 则由式(5)、(7)、(8)得出:

$$H = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi \quad (9)$$

由上式可知, 系统的膜厚测量精度与系统的光源波长、测相系统的测相精度成正比。显然, 在这两者中, 测相精度的提高决定了系统膜厚测量精度的提高。

系统的膜厚测量灵敏度

$$\delta H = \frac{\lambda}{4\pi} \delta(\Delta\phi) \quad (10)$$

其中 $\delta(\Delta\phi)$ 为系统的测相灵敏度。由于系统选用测相灵敏度为 0.1° 的 BX23A 型数字相位计为测相系统, 光源为 He-Ne 激光器, 则系统的膜厚测量灵敏度为 0.1nm 。

值得注意的是, 测量时入射光束和反射光束的中心距离 $2b$ 应尽可能小。 b 越小, 两反射光束经透镜和渥拉斯顿棱镜后, 重合得越好, 系统误差越小。但 b 不能为零, 否则, 反射光束返射入激光腔, 会引起激光腔衰减, 导致激光频率的不稳定。

三、实验结果和分析

实验原理如图 1, 系统采用纵向塞曼双

频稳频 He-Ne 激光器作光源, 输出光波长为 632.8 nm, 频差为 1.64 MHz, 频差稳定度优于 1.3×10^{-4} , 光频稳定度优于 10^{-8} , 光电检测器选用光电二极管, 用双踪示波器监视参考信号和测量信号, 选用测相灵敏度为 0.1° 的 BX23A 型高频数字相位计作为相位测量系统, 同时相位计的模拟输出口可与计算机和 X-Y 记录仪相连, 进行实时测量。

在恒温、防震和封闭良好的实验条件下, 待测膜样品置于高精度平移平台上, 两聚焦光点沿平行于它们的连线方向, 垂直扫描待测膜层边线。

图 5 为系统选择不同的渥拉斯顿棱镜和透镜, 对同一待测膜进行测量的测量曲线。曲线中凸形部分或凹形部分的宽度即是两扫描光点的间距。待测膜表面轮廓的分辨情况直接取决于光束的横向分辨率(即光点的大小), 而光束的横向分辨率是由透镜的焦距大小决定的。光束的横向分辨率越小, 待测膜表面轮廓曲线越细迹。图 5(a) 中, 透镜焦距为 120 mm, 横向分辨率为 $13 \mu\text{m}$, 则测量曲线只描绘出了待测膜表面的大致轮廓, 而图 5(d) 中, 透镜焦距为 37.5 mm, 横向分辨率为 $4 \mu\text{m}$, 测量曲线几乎给出了待测膜表面的所有细迹。膜厚测量值为 48.8 nm。

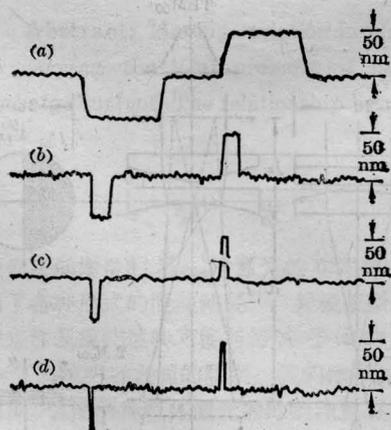


图 5 光学膜厚测量

(a) $\alpha=3.3^\circ, f=120\text{mm}$; (b) $\alpha=3.3^\circ, f=37.5\text{mm}$; (c) $\alpha=0.33^\circ, f=120\text{mm}$; (d) $\alpha=0.33^\circ, f=37.5\text{mm}$



图 6 Talysurf-6 型触针仪的膜厚测量

图 6 是 Talysurf-6 型金刚石触针仪对同一待测膜的测量曲线, 膜厚测量值为 48 nm, 与超外差法测量结果基本符合, 两者的微小差值, 主要是由于测量精度受限于仪器本身的测量精度而引起的。

在系统精密测量光学膜厚中, 空气扰动对测量精度的影响较大, 因此, 干涉光路需调节至最佳状态。当入射光束的分束点偏离透镜后焦面时(图 2), 由待测膜表面反射的两反射光束, 经透镜和渥拉斯顿棱镜后, 将不完全重合。它们各自光程受气流影响的增大, 导致了其光程差的不断波动, 在示波器上, 即可观察到测量信号的持续抖动。同时, 入射光束和反射光束的中心距离应尽可能小, 即使两反射光束在渥拉斯顿棱镜中的共光束点与入射光的分束点尽可能接近, 则两反射光束经过渥拉斯顿棱镜后, 能更好地重合。

四、结 论

实验结果和理论分析表明, 光学超外差法测量光学膜厚是一种高精度测量方法, 测量灵敏度为 0.1 nm 量级, 优于椭圆偏振仪的测量灵敏度, 且采用非接触测量, 计算简单。

参 考 文 献

- 1 Joffe B B. *Plat. and Surf. Finish*, **70**(9), 40 (1983)
- 2 Zapka W. *IBM Tech. Disclosure Bull.*, **27**(1B), 720(1984)
- 3 Sandercock J R. *J. Phys. E(GB)*, **16**(9), 866(1983)
- 4 Opsal J *et al.* *Appl. Opt.*, **22**(20), 3169(1983)
- 5 吴启宏 *et al.* *浙江大学学报*, **14**(4), 89(1980)
- 6 胡岳风. *光学技术*, (2), 2(1984)
- 7 梁铨廷, *物理光学*(机械工业出版社, 1980), 211
- 8 梁铨廷, *物理光学*(机械工业出版社, 1980), 288
- 9 赵克功. *计量与仪器*, (3), 2(1977)
- 10 郭继华. *清华北大理工学报*, **2**(4), 53(1975)
- 11 中国计量院. *物理*, **2**(1), 35(1973)