

三维扫描技术在薄膜厚度分布测量中的应用*

李鸣明¹ 孙燕² 赵宏¹

(1 西安交通大学机械学院激光与红外应用研究所, 西安 710049)

(2 空军工程大学工程学院, 西安 710038)

摘要 提出了利用相位跟踪法测量薄膜厚度分布的新方法, 介绍了测量系统各部分的结构, 给出了测量结果. 实验表明, 对于硅片上的 PbTiO₃ 薄膜, 测试误差小于 7 nm.

关键词 宽带光源; 白光干涉; 相位跟踪

中图分类号 TH741 **文献标识码** A

0 引言

随着薄膜材料的发展, 基片上常镀上一层薄膜以增强其光学或电学性能, 为了充分利用薄膜性能, 迫切需要测定薄膜的均匀性和厚度分布. 对于透明薄膜, 常用的测试方法是椭偏仪, 能同时测出薄膜的厚度和折射率, 不足之处在于该方法要求入射光以两个不同的入射角入射, 对薄膜的均匀性要求较高, 不适合厚度不均的薄膜测量, 而且光路 and 数据处理都比较复杂, 使用不够灵活; 文献[1]利用白光干涉术测量薄膜厚度, 光路简单, 测量精度高, 但该方法利用光谱峰值点的位置计算薄膜厚度, 峰值点位置确定容易受噪声的干扰. 特别是对于厚度远大于宽带光源中心波长的薄膜, 光谱分布的周期小, 影响测量精度. 对于厚度远小于宽带光源中心波长的薄膜, 光谱分布的周期大, 测试原理就限制了其测试精度; 文献[2]提出了相位跟踪法测量薄膜厚度, 测试精度高, 适合测量薄膜厚度的微小变化, 其根本点仍然是确定峰值点位置的变化. 本文将二者结合起来, 以前一种方法测量基准点的厚度, 然后利用相位跟踪法测量薄膜厚度的微小差值, 从而得到薄膜的厚度分布. 这种方法可得到 7 nm 的测量精度.

1 基本原理

宽带光源的光谱可以认为是由单色光叠加得到的. 当宽光谱光束干涉时, 可以认为是由各种单色光分别相干涉的平均效果. 由于各种单色光的波长不相同, 相同的路径引起的相位变化并不相同, 因而光强的变化也不相同. 宽带光源干涉的相位跟踪技术就是基于这一点. 其原理如图 1 所示. 入射光束 i 波长为 λ , 分别在附着于基底表面底薄膜的上下表

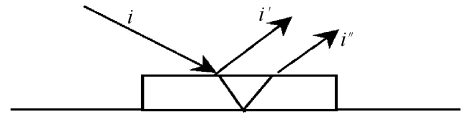


图1 薄膜干涉示意图

Fig. 1 Interference of film

面被反射, 两束反射光分别为 i' 、 i'' , 如果以 I_0 代表入射光光强, I 代表干涉之后的光强, I_1 、 I_2 代表 i' 、 i'' 的光强, 那么

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(2n\pi\Delta L/\lambda) \quad (1)$$

式中, ΔL 代表光束 i' 、 i'' 的路径差, n 是薄膜折射率. 如果入射光垂直于基底表面, 而且认为 $I_1 = I_2$, 有

$$\Delta L = 2S \quad (2)$$

$$I = 2I_1 \{1 + \cos(2n\pi\Delta L/\lambda)\} \quad (3)$$

式(2)中, S 代表薄膜厚度. 如果

$$S = m(\lambda/2n) \quad m = 0, 1, 2, 3 \quad (4)$$

则出现极值点. 其波形如图 2.

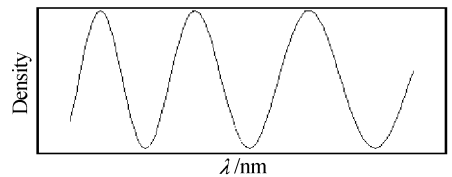


图2 光强随波长变换

Fig. 2 Curve of density with wavelength

如果确定极值点的阶数, 即 m 的值, 就可以计算出薄膜厚度, 从而确定薄膜的厚度分布. 但确定极值点的位置会引入较大误差, 而且当薄膜厚度过大或过小时, 测试误差很大. 对于薄膜厚度分布测量, 主要是确定薄膜厚度变化, 因此, 本系统只是选取一点做基准.

当只取宽带光源的一小段波长范围内的光谱时, 有: $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$, λ_0 是中心波长.

于是光强为

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos\{4n\pi S/(\lambda_0 + \Delta\lambda)\} \approx I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos\{4n\pi S/\lambda_0 - (4n\pi S/\lambda_0^2)\Delta\lambda\} \quad (5)$$

整理得

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos\{(4n\pi S/\lambda_0^2)\Delta\lambda - 4n\pi S/\lambda_0\} \quad (6)$$

*西安交通大学行动计划资助项目

Email: firstlmm@sohu.com

收稿日期: 2003-02-27

以上作了近似处理

$$1/(\lambda_0 + \Delta\lambda) = (1/\lambda_0)[1/(1 + \Delta\lambda/\lambda_0)] = 1/\lambda_0 - \Delta\lambda/\lambda_0^2 \quad (7)$$

当 $\Delta\lambda \ll \lambda_0$ 时, 该点光谱强度曲线的相位为: $4n\pi S/\lambda_0$, 取相隔很小的两点 A、B, 并计及光线往返, 相位差为

$$\Delta\Psi = 4n\pi\Delta S/\lambda_0 \quad (8)$$

相位跟踪法如图 3 所示.

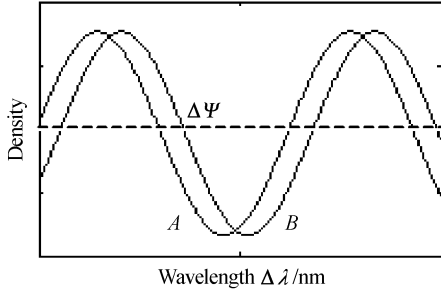


图 3 相位跟踪法

Fig. 3 Phase difference trace

以上分析作了许多近似. 它要求截取的一段光谱足够窄, 确保式(6)成立. 相邻的两个测量点之间的位移足够小, 确保 $\Delta\Psi < \pi$, 不至于发生薄膜厚度变化状态判定的错误. 选定一个基准点之后, 如果薄膜厚度增加, $\Delta\Psi > 0$; 如果薄膜厚度减少, $\Delta\Psi < 0$; 累计变化量, 就可以得到薄膜的厚度变化.

本系统将光纤固定在二维位移平台上, 得到均匀分布的测试点的厚度, 从而得到薄膜的三维形貌.

2 系统结构

2.1 整体结构

测量系统结构如图 4.

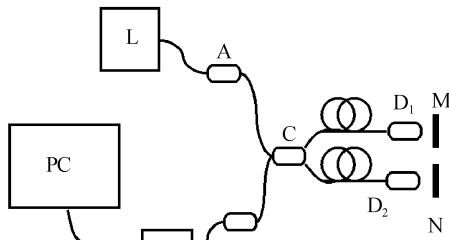


图 4 系统结构

Fig. 4 System structure

L 是美国海洋光学公司的宽带高稳定光源, 通过光纤连接器耦合到光纤中, 进入“X”形光纤分光器 C, D_1 和 D_2 是自聚焦透镜, 直径 1.5 mm. M 是附着了透明薄膜的基片, 并被固定在二维位移平台上; N 原本用于补偿光源的波长分布曲线, 在最初的测试中不用. 入射光在薄膜上下表面反射, 进入光纤发生干涉, 通过连接器 B 耦合到分光系统和光谱处理系统 G 中; PC 一方面控制位移平台移动基片, 一方面读取 DSP 处理系统计算的薄膜厚度变化, 最后给出薄膜厚度分布三维图形.

2.2 分光系统

为了得到归一化光强随波长的变化关系, 即: $I = I(\Delta\lambda)$, 分光系统将不同波长的光在空间色散开来, 其原理可以由图 5 说明.

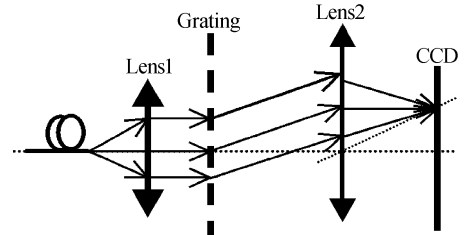


图 5 分光系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of beam splitting system

分光系统由透镜和光栅组成, CCD 用于接收分光之后的频谱分布数据. 光从光纤端面射出, 经透镜 Lens1 准直变成平行光, 打在光栅 Grating 上, 发生衍射. 线阵 CCD 置于透镜 Lens2 的焦面上, 得到宽带光源的频谱分布.

由光栅的线色散公式得

$$\Delta L/\Delta\lambda = mf/(d \cos \theta), \text{ 即}$$

$$\Delta L = mf/(d \cos \theta) \Delta\lambda \quad (9)$$

式(9)中, m 代表光谱的级数, d 代表光栅常量, ΔL 是波长相差 $\Delta\lambda$ 的两条谱线之间的空间距离.

可见, 不同波长的谱线对应的空间位置也不同, ΔL 与 $\Delta\lambda$ 成正比. 实际上, 为了使结构更加紧凑, 采用了李特洛自准反射式光谱仪的结构. 如图 6 所示.

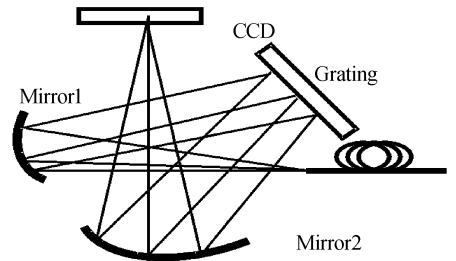


图 6 李特洛自准反射式光谱仪的结构图

Fig. 6 Litterio self-focusing reflective spectrometer

光从光纤端面射在球面镜(Mirror1)上, 变成平行光(实际上用自聚焦透镜代替). 打在光栅(Grating)上, 衍射光由球面镜(Mirror2)聚焦在 CCD 上. 读取线阵 CCD 的数据就可以得到 $I = I(\Delta\lambda)$ 的函数关系.

所用光栅的光栅常量是 1/1200 mm, CCD 是 2048 像素的线阵 CCD.

2.3 数据处理系统结构

数据处理系统结构比较复杂, 是一个 CCD 数据采集和 DSP 为核心高速数字信号处理系统. DSP 系统具有强大的处理能力, 可以快速提取光谱曲线的相位移动. CCD 是 2048 单元的线阵 CCD, A/D 采用 12 bA/D, 每帧需要 4 K 字节的存储单元, 因此采用两片 2 k 字节的双口 RAM, 接口电路设计比较简

单; DSP 芯片采用 TMS320VC5402PGE100, 可以 100 M 的峰值速度运行; 为了简化设计, PC 和 DSP 之间通过 DSP 的 HPI 接口交换数据.

3 数据处理方法及测试结果

相位跟踪法测试系统精度高, 其精度主要由相位移动测试的精度决定. 实际采用了傅里叶变换的方法确定位相移动, DSP 处理系统确保了处理速度.

根据式(6)作傅里叶变换, 有

$$F(I) = (\pi/2) \int \{U(\lambda) e^{-j\omega\lambda}\} d\lambda = a\delta(\omega) + be^{-j4n\pi S/\lambda_0} \delta(\omega + 4n\pi S/\lambda_0^2) + be^{j4n\pi S/\lambda_0} \delta(\omega - 4n\pi S/\lambda_0^2) \quad (10)$$

式中 a, b 为傅里叶变换之后的常数. 傅里叶变换之后, 得到谱峰的复系数, 就可以确定其相位.

图 7 是 2 mm × 2 mm 范围内 PbTiO₃ 薄膜的三维形貌分布. 步进电机步长为 100 μm, 扫描范围为

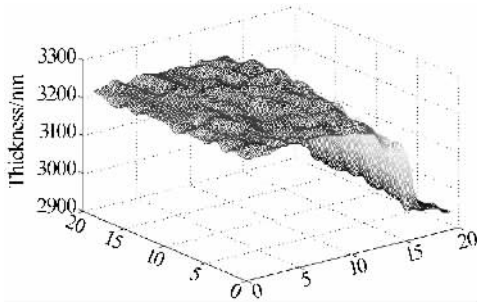


图 7 PbTiO₃ 薄膜的三维形貌分布

Fig. 7 Thickness distribution of PbTiO₃ film

20 点长及 20 点宽, 共 400 点. 图中水平面的两维坐标表示扫描时取样点的位移步数, 步长为 100 μm, 空间坐标为位移步数乘以步长. 纵轴表示薄膜的厚度, 为了表明薄膜厚度的起伏变化, 将其厚度乘以 3 后作图. 椭偏仪只能测出均匀薄膜的厚度, 因此给出的是平均厚度, 为 1019.8 nm, 而用相位跟踪法测出的平均厚度为 1018.4 nm, 并测出各点的厚度变化如图.

4 结论

本文介绍了相位跟踪法测量薄膜厚度分布的原理、方法和系统组成. 该方法非接触、精度高, 可达 7 nm 的测试精度; 嵌入式的 DSP 系统保证了快速测量, 系统结构简单有效.

参考文献

- 1 Sun Yun, Sun Feng, Zhao Hong, *et al.* Research on roughness measurement by reflected interference spectrum methods. *Interference of Optical Test*, Hefei, Anhui, 2002. 307 ~ 312
 - 2 Cheng Duanjun (25 Hopewell Dr. Soney Brook N Y 11790). Optic fiber direct-sensing bio-probe using a phase-tracking approach. U. S patent. Patent Number: 5, 804, 453. Date of Patent: Sep. 8, 1998
 - 3 李鸣明. 光纤传感器在微机电系统振动测量中的应用. *光子学报*, 2001, **30**(4): 438 ~ 441
- Li M M. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4): 438 ~ 441

3D Scanner on Thickness Distribution of Uneven Transparent Film

Li Mingming¹, Sun Yan², Zhao Hong¹

¹ Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China 710049

² Engineering University of Air Force, Xi'an, China 710038

Received date: 2003-02-27

Abstract A method to obtain film thickness distribution is discussed, which is based on phase tracing principle. Structure of the system is introduced, and result is given. For film coated on silicon floor, deviation is less than 7 nm.

Keywords Wide-band light source; White-light Interference; Phase tracing



Li Mingming was born in 1970. He obtained B. S. in 1991 from Xi'an Jiaotong University, and M. S. in 1996 from University of Huazhong Science and Technology, respectively. Now he is working in Xi'an Jiaotong University. His major research field is optic fiber sensor.