

文章编号: 1001-3806(2005)01-0098-03

薄膜应力激光测量方法分析

王 成, 马 莹, 张贵彦, 肖孟超, 甘志宏, 缪同群, 钱龙生*
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022)

摘要: 总结了薄膜应力的一些测量方法。分析了利用测量基片弯曲曲率的激光宏观变形分析法——激光干涉法、激光束偏转法的理论依据及其测量原理, 计算了各种测量方法的测量精度。激光干涉法的精度可达 0.92%, 可测量的最小应力值为 15.7 MPa, 激光束偏转法较低, 为 2.12%, 可测量的最小应力值为 25.5 MPa, 空间分辨率低, 约为 100 μm。

关键词: 激光; 薄膜; 应力; 测量

中图分类号: O484.5 文献标识码: A

Analysis of laser measurement for thin-film stress

WANG Cheng, MA Ying, ZHANG Guiyan, XIAO Meng-chao, GAN Zhi-hong, MIAO Tong-qun, QIAN Long-sheng
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract Various measurements of thin-film stress are summarized. The basic theory and measuring principle of laser macro deformation analysis (including laser interference measurement and laser beam deflexion measurement) that utilized substrate curvature measurement are analyzed; the precision of different measurements is evaluated. The precision of laser interference measurement nearly reaches 0.92% and the least stress that could be measured is 15.7 MPa. Compared to laser interference measurement, the precision of laser beam deflexion measurement is low, it is about 2.12%, the least stress which could be measured is 25.5 MPa and space resolution is low as well, which is approximate 100 μm.

Key words laser thin-film; stress measurement

引 言

光学薄膜这门学科已成为现代光学不可或缺的一个重要组成部分, 没有光学薄膜, 许多现代光学装置便无法发挥效能。随着通信容量的增加和速率的加快, 光通信逐渐成为现代通信的主要传播形式, 这又给薄膜带来了新的商机。微电子复合组件(薄膜、基底、封装)工艺性能的研究是大规模集成电路发展的关键问题, 由于薄膜自身的特殊性, 其性能的研究已成为微电子封装工艺的重要研究课题之一。薄膜应力研究在薄膜基础理论和应用研究中起到十分重要的作用。在实际应用中, 在薄膜沉积过程中和沉积后的热机械过程中固有的内应力削弱甚至破坏薄膜与基体间的附着, 它的存在不仅会造成膜层的损坏、失效, 导致薄膜的龟裂、脱落, 而且会作用于基体, 使基体发生形变, 从而使通过薄膜元件的光场发生畸变, 影响传输特性。这对薄膜器件的稳定性、可靠性有着不利的影响。因此, 薄

膜应力的研究显得尤为重要。

一般来说, 薄膜应力分为 3 部分^[1-3]: 热应力, 主要由衬底材料和薄膜材料热膨胀系数不同造成; 外应力, 主要由连接膜层和环境之间的膜层中杂质产生; 内应力, 由镀膜工艺技术引起。薄膜应力在宏观上通常表现为基片的弯曲。一般离子束溅射、离子辅助和离子镀膜技术制备的膜层是致密的, 表现为压应力, 应力造成的形变使基片朝膜的一侧凸起; 而蒸发技术制备的膜层是多孔的, 通常显示为张应力, 基片背向膜的方向凸起。只要测出这个弯曲的曲率, 就可以分析出薄膜的应力大小。这个曲率通常可以采用激光干涉或激光偏转的方法测定。

1 激光变形分析法的理论依据

激光变形分析法的理论依据是利用基片弯曲变形的应力测量。这种测量方法是当前较为广泛使用的测量薄膜应力的方法之一^[4], 是一种基于弹性理论测量薄膜应力的实验方法(推导应力与变形量间的关系参见文献[5]):

$$\sigma = \frac{r^2}{6} \cdot \frac{E}{(1-\nu)} \cdot \frac{t_s^2}{t_f} \cdot \frac{1}{R} \quad (1)$$

式中, r 为基片的半径; E , ν 为衬底的杨式模量和泊松比; t_s , t_f 分别为衬底和薄膜的厚度; R 为弯曲的曲率半

基金项目: 国家八六三计划资助项目(2001AA312100)

作者简介: 王 成(1977), 男, 博士研究生, 现从事光学薄膜、激光技术方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: cn863@public.cc.jl.cn

收稿日期: 2003-12-31; 收到修改稿日期: 2004-03-01

径。(1)式也可以近似为^[6,7]:

$$\sigma = \frac{1}{3} \frac{E}{(1-\nu)} \cdot \frac{t_s^2}{t_f} \cdot \frac{\Delta h}{r_s^2} \quad (2)$$

式中, r_s 为基片半径, Δh 为基片的变形量。其余与(1)式相同。(1)式就是利用弯曲变形测量应力的理论基础。即无论用什么测量手段, 只要精确地测量 R 的值, 就可以计算出应力的大小。目前测量薄膜应力大小的方式, 大都是利用上述的物理原理, 而最大的差异在于使用什么方式决定基板因薄膜附着后的弯曲量大小, 例如使用显微镜观测弯曲量的大小或观察干涉条纹的数目差代表干涉条纹的变化量, 来计算基板因薄膜附着后的弯曲大小, 不过以这些方法决定的基板弯曲差异程度较不准确, 因为必须使用较大刻度配合人为判断方式测量弯曲量。随着激光技术的发展, 大幅度地提高了曲率测量的精度。下面介绍几种当前精确测量 R 的实际方法。

2 测量方法分析

2.1 激光干涉法

从衬底的应变求弹性变形量方法有: (1)把衬底一端固定, 求出膜生长时产生的自由端位移, 又叫光杠杆法; (2)使用圆形衬底, 从镀膜前后牛顿环的移动量求出弹性变形量, 又叫圆片法。

在传统方法的基础上, 结合计算机和激光干涉等技术, 人们又提出了新的测量方法。HILL^[8] 等人介绍了一种干涉相移式测量薄膜应力的方法。如图 1 所

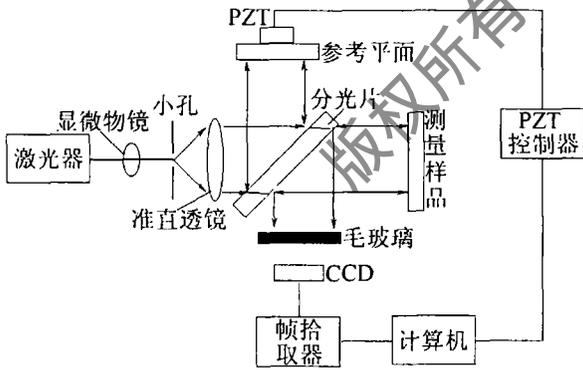


图 1 相移式 Twyman-Green 干涉仪

示, 首先建立一套相移式 Twyman-Green 干涉仪, 由一 He-Ne 激光器经一显微物镜与针孔所构成的空间滤波器形成一点光源, 再经准直透镜产生一平面波前, 用分光镜将平面波前振幅分割为反射波前和透射波前, 然后反射光和透射光经参考面与待测面(基板)反射之后, 两反射光再经分光镜重新合并成单一光束成像于毛玻璃屏幕上, 利用 CCD 相机将干涉图像显示在监视器上, 这种相移式 Twyman-Green 干涉仪可以测量镀膜前和镀膜后干涉条纹的相位, 相移方式的基本原理是遵循 Hariharan 演算法, 为此建立一套以个人电脑为基

础的膜应力测量系统。在干涉仪的参考面处安装一个电脑控制的压电陶瓷元件(PZT), 以等位移量 $1/8$ 波长连续移动参考面至 5 个位置的干涉图, 利用相移技术可获得待测波前的轮廓图, 从 5 张干涉图中的每一像素的数字化强度代入下式: $\Phi = \tan^{-1} [2(I_2 - I_4) / (2I_3 - I_5 - I_1)]$, 求出的相位函数代表待测波前的轮廓图, 然后经过 Zemke 多项式拟合, 可以得出待测面的形状轮廓图, 得到 R 值。

由(2)式可知, 装置的测量灵敏度取决于可检出的最小变形量 Δh , 其实际数值为 $\lambda/50$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。衬底材料为 K9, $E = 8.132 \times 10^{10} \text{ Pa}$, $\nu = 0.209$, 衬底厚度 $t_s = 0.5 \text{ mm}$, 衬底半径 $r_s = 20 \text{ mm}$; 薄膜厚度 $t_f = 0.275 \mu\text{m}$, 最小应力值为: $\sigma_{\min} = \frac{E}{3(1-\nu)} \cdot (t_s^2/t_f) \cdot (\Delta h/r_s^2) = 15.7 \text{ MPa}$ 。测量精度由(2)式中各量的测量精度决定。根据它们的测量方法有: $\Delta t_s = 1 \mu\text{m}$, $\Delta(\Delta h) = 0.0126 \mu\text{m}$, $\Delta r_s = 1 \mu\text{m}$ 。膜厚测量精度为 0.5%, 由误差传递公式 $E_s = 2 \cdot \Delta t_s/t_s + 0.5\% + 2\Delta r_s/r_s + \Delta(\Delta h)/\Delta h = 0.92\%$ 。

2.2 激光束偏转法

图 2 为实验装置图^[9,10]。利用(1)式求得曲率半径 $R = \Delta s / \Delta\alpha$, 其中 Δs 为弧长增量, $\Delta\alpha$ 为对应的弧切线

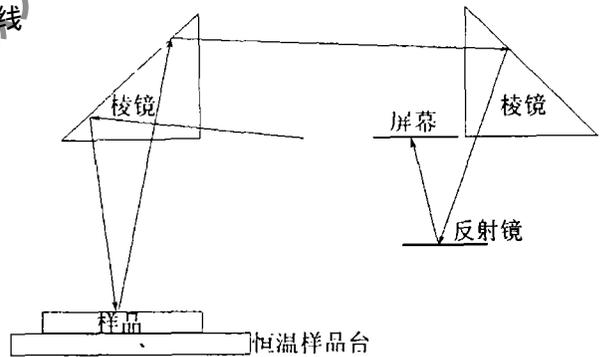


图 2 薄膜应力测试装置结构示意图

倾角增量。应力测量中, 因被测样品尺寸远小于其曲率半径, 可将样品移动距离 Δx 看作弧长增量, $\Delta x \approx \Delta s$ 。图 3 为测试装置简化光路图, $AB = \Delta s \approx \Delta x$, 可以

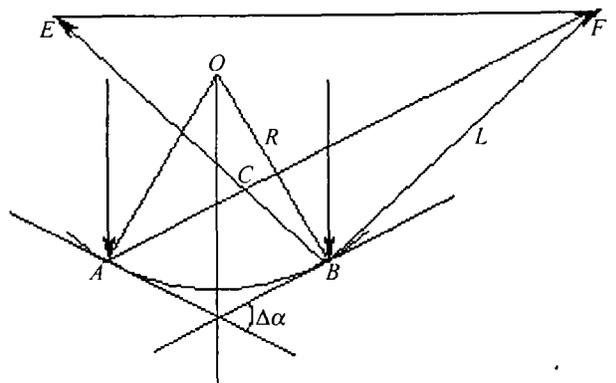


图 3 测试装置简化光路图

求得 $\angle ACB = \angle EBF = 2\Delta\alpha$ 。由于屏上光点移动距离 Δd 远小于反射光程 L , 可以将 Δd 视为半径 L 的一段弧, 从而有:

$$\angle EBF = \Delta d / L = 2\Delta\alpha, \Delta\alpha = \Delta d / 2L \quad (3)$$

$$R = \Delta s / \Delta\alpha = \Delta x / \Delta\alpha = 2L \cdot \Delta x / \Delta d \quad (4)$$

$$\sigma = [E / 12(1 - \nu)] \cdot (t_s^2 / t_f) \cdot (\Delta d / L \Delta x) \quad (5)$$

根据 (5) 式, 在衬底及薄膜确定后, 移动样品一段距离 Δx , 测得对应的光点位移 Δd , 即可求得薄膜应力。

另外一种利用光学方法测量弯曲变形来间接测量应力的实验方法, 如图 4 所示^[10], 原理同上, 也是通过测量 x 的变化量来求 R 的变化量, 进而求出应力值。

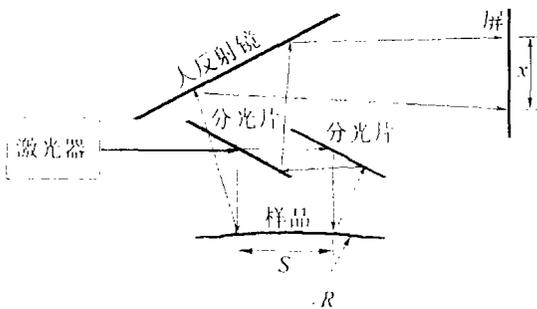


图 4 弯曲测量装置图

装置的测量灵敏度取决于可检出的最小光点位移 Δd_{\min} , 其实际数值为 1.5mm 。衬底材料为 K9 $E = 8.132 \times 10^{10} \text{Pa}$ $\nu = 0.209$; 衬底厚度 $t_s = 0.5\text{mm}$, 薄膜厚度 $t_f = 0.275\mu\text{m}$, 反射光程 $L = 10\text{m}$, 样品移动距离 $\Delta x = 50\text{mm}$, 则:

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{12(1 - \nu)} \cdot \frac{t_s^2}{t_f} \cdot \frac{1}{L \Delta x} \cdot \Delta d_{\min} = 25.5 \text{MPa} \quad (6)$$

测量精度由 (5) 式中各被测量的精度决定。根据它们的测量方法, 有 $\Delta t_s = 1\mu\text{m}$, $\Delta t_f = 2\text{nm}$, $\Delta L = 0.01\text{m}$, $\Delta(\Delta x) = 0.05\text{mm}$, $\Delta(\Delta d) = 0.1\text{mm}$, 取 $\Delta d = 50\text{mm}$ 。由误差传递公式:

$$E_o = 2 \cdot \Delta t_s / t_s + \Delta t_f / t_f + \Delta L / L + \Delta(\Delta x) / \Delta x + \Delta(\Delta d) / \Delta d = 2.12\% \quad (7)$$

利用基片弯曲变形测量应力的方法是一种宏观的间接应力测量方法, 其主要思想是利用弹性力学原理将薄膜应力表现为宏观的形变问题。在测出基片的弯曲的

基础上, 利用应力与应变的关系 (1) 式来计算应力。优点为不要求薄膜的特性; 迅速而且非破坏性。缺点为薄膜在厚的基片上; 变形前后要有比较。应力分辨率低, 对同种衬底和相同厚度薄膜激光干涉法的分辨率为 15.6MPa 测量精度为 0.92% 。激光偏转法的为 25.5MPa 测量精度为 2.12% 。空间分辨率约为 $100\mu\text{m}$ 。

3 结 论

分析了利用基片弯曲变形测量薄膜应力的基本原理和测量方法依据, 对宏观变形测量的两种方法进行了比较, 得出激光干涉法在精度上优于激光偏转法, 激光干涉法的精度可达 0.92% , 可测量的最小应力值为 15.7MPa 。激光束偏转法较低, 为 2.12% , 可测量的最小应力值为 25.5MPa 。空间分辨率低, 约为 $100\mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- [1] DOERNER M, FINK W, D. Stresses and deformation processes in thin films on substrates [J]. CRC Critical Review in Solid State Science 1988, 14(3): 225~268.
- [2] WINDSCHMANN H. Intrinsic stress scaling for polycrystalline thin films prepared by ion beam sputtering [J]. JAP, 1987, 62(5): 1800~1807.
- [3] PULKER H K. 仲永安, 谢于深. 玻璃镀膜 [M]. 上海: 科学出版社, 1988. 315.
- [4] 田民波, 刘德令. 薄膜科学与技术手册 (上册) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991. 144~146.
- [5] GLANG R, HOLMWOOD R A, LROSENFELD R. Determination of stress on single crystalline silicon substrates [J]. Rev Sci Instr 1965, 36: 361~364.
- [6] 熊胜明, 张云洞, 唐晋发. 电子束反应蒸发氧化物薄膜的应力特性 [J]. 光电工程, 2001, 28(1): 13~15.
- [7] CHUEN L, CHENG Ch L, CHENG Ch J. The measurement of thin film stress using phase shifting interferometry [J]. Journal of Modern Optics 2000, 47(5): 839~849.
- [8] HILL R, THOMAS M E R, HARTNET M P. The use of surface profilometers for the measurement of wafer curvature [J]. Vacuum Science and Technology 1988, 6: 231~235.
- [9] 杨银堂, 付俊兴, 周 端. 半导体基片上薄膜应力的测试装置 [J]. 仪器仪表学报, 1997, 18: 228~231.
- [10] PIEŃKOS T, GĄDYSZEWSKI L. Determination of strain and stress in thin films using curvature measurements [J]. Review of Scientific Instruments 1998, 69(2): 460~462.
- [11] 王 辉, 何 旭, 金伟民. 体视全息照相的简化设计 [J]. 中国激光, 1995, A22(1): 60~64.
- [12] 是度芳, 钟志有, 王 荣 et al. 相移全息 CT 技术测量双烛火焰温度场 [J]. 光学学报, 1996, 16(6): 768~771.
- [13] 王瑞芳. 采用激光双曝光全息干涉技术研究相互耦合的柴油机压缩温度场与喷雾场 [J]. 应用激光, 2001, 21(5): 331~332.
- [14] 刘东红. 用于温度场研究的光折变全息干涉计量术 [J]. 光电工程, 2001, 28(2): 32~35.
- [15] 赵建林, 谭海蕴. 电子学全息干涉术用于温度场测量 [J]. 光学学报, 2002, 22(12): 1447~1451.

(上接第 51 页)

- [3] TRIVIM, RABAL H, BOLOGNINI N et al. Three-dimensional display through speckle stereograms [J]. Appl Opt 1986, 25(20): 3776~3780.
- [4] 尚庆虎, 唐良桂, 于美文. 一种全息立体显示仪 [J]. 北京理工大学学报, 1989, 9(3): 43~47.
- [5] PRKRYL I. Holographic maps [J]. Appl Opt 1982, 21(16): 2882~2885.
- [6] YAMAGUCHI M, OHYAMA N, HONDA T. Holographic three-dimensional printer new method [J]. Appl Opt 1992, 31(2): 217~222.