

文章编号: 1001-3806(2016)04-0472-04

## 紧凑型光谱薄膜测厚仪的研制

刘佳敏, 陶 泽, 张传维\*, 刘世元

(华中科技大学 数字制造装备与技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 为了开发一种用于测量各向同性均匀薄膜介质厚度的紧凑型薄膜测厚仪, 采用了共光路垂直入射设计, 利用薄膜干涉原理, 通过非线性优化算法对反射光谱进行了拟合, 反演计算出了薄膜样品的厚度。采用该仪器测量部分 SiO<sub>2</sub>/Si 薄膜样件, 测量结果与商业椭圆仪测量结果之间的相对偏差小于 0.5%, 而单次测量时间仅为 70ms。结果表明, 该薄膜测厚仪具有对测量距离不敏感、光路简洁、结构紧凑及重复性精度良好等优点, 对实现在线实时测量功能具有积极意义。

**关键词:** 测量与计量; 光谱薄膜测厚仪; 紧凑; 逆问题; 干涉; 不确定度

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.003

## Development of a compact spectral thickness measurement instrument for thin film

LIU Jiamin, TAO Ze, ZHANG Chuanwei, LIU Shiyuan

(State Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to develop a compact instrument to measure the thickness of isotropic uniform thin films, applying a common normal incident path and thin-film interference principle, the film thickness was calculated inversely by fitting the measured reflectance spectrum with nonlinear optimization algorithm. The relative error between the thickness of a SiO<sub>2</sub>/Si thin film measured by the proposed instrument and that measured by the commercial ellipsometer was less than 0.5%, and the time for a single measurement was about 70ms. Experimental results show that the proposed instrument has advantages of insensitivity to measuring distance, concise light path, compact structure and excellent repeatability. The study has great significance for online measurement of thin film thickness.

**Key words:** measurement and metrology; spectral thickness measurement instrument for thin film; compact; inverse problem; interference; uncertainty

### 引 言

随着半导体技术的进步, 薄膜日益广泛地应用于微电子器件、微光机电系统和光学元器件等领域<sup>[1]</sup>。薄膜厚度是显著影响薄膜力学、电磁和光电等性能的一个重要参量<sup>[2]</sup>, 因此在薄膜制备和分析应用中, 薄膜厚度的精确测量显得尤为重要。

薄膜的测量方法主要分为非光学方法和光学方法, 其中光学测量方法是实现薄膜参量无损测量的主要手段。光学测量方法主要包括棱镜耦合法、椭圆测量法和光谱法等<sup>[3]</sup>。其中棱镜耦合法需要产生多个

光导膜<sup>[4]</sup>, 因而仅能测量较厚的薄膜; 椭圆测量法虽然能够表征薄膜的多个参量如膜厚、折射率和消光系数等<sup>[5]</sup>, 但基于该方法的椭圆仪比较昂贵且有使用环境的局限性, 一般仅应用在科研型设备上; 光谱法以光的干涉理论为基础<sup>[6]</sup>, 通过测量薄膜的光谱特性来计算膜厚, 该方法原理成熟、硬件实现简单、适用环境广泛。然而, 目前基于光谱法所设计的薄膜测厚仪器多通过测量薄膜的透射率曲线来计算膜厚<sup>[7]</sup>, 这使得仪器结构尺寸大且器件分散难以集成, 导致难以应用于在线检测; 同时, 因测量光会聚到样品表面而导致测量结果依赖于测量距离, 仪器适应性较差。

本文中设计了一种反射式紧凑型薄膜测厚仪, 其基本原理是通过测量样件的反射光谱, 结合薄膜反射模型以逆问题求解的方式计算膜厚; 在该设计中, 作者利用分束器实现共光路紧凑结构, 并采用平行光束作为测量光以消除测量结果对测量距离的敏感性。该仪器结构紧凑易于安装、测量速度快、测量精度高、操作简单、能实现在线测量。

基金项目: 湖北省科技支撑计划资助项目(2014BEC052); 湖北省自然科学基金资助项目(2015CFB278); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2011YQ160002)

作者简介: 刘佳敏(1994-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光谱椭圆仪的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: chuanweizhang@hust.edu.cn

收稿日期: 2015-10-19; 收到修改稿日期: 2015-10-27

本文中重点介绍了该紧凑型薄膜测厚仪的测量原理,并给出了计算薄膜厚度的公式和数据处理算法,同时展示了仪器的原型系统设计和实验数据结果分析,验证了该仪器测量结果稳定可靠、准确性高等特点。

### 1 原理与方法

本文中紧凑型薄膜测厚仪采用光谱法测量薄膜厚度,本质是光的干涉原理,也就是当膜厚仪向待测薄膜发射可见光谱范围的测量光时,薄膜和空气界面的反射光会与薄膜和基底界面的反射光相干涉形成反射光谱<sup>[8]</sup>,在给定薄膜材料介电常数的色散模型和薄膜层结构模型下,该光谱仅与波长和薄膜厚度参量有关<sup>[9]</sup>。如图 1 所示,以 air/SiO<sub>2</sub>/Si 薄膜模型为例,构建薄膜的反射率和其膜厚之间的函数关系。令空气、SiO<sub>2</sub> 和 Si 的折射率分别为  $n_0, n_1$  和  $n_2$ , SiO<sub>2</sub> 的膜厚为  $d$ , 波长为  $\lambda$ 。由于在紧凑型薄膜测厚仪中入射光束是垂直入射到薄膜样件表面,那么入射角  $\theta_0 = 0^\circ$ , 则所有折射角  $\theta_1, \theta_2$  和反射角  $\theta_0'$  均为  $0^\circ$ 。由于 SiO<sub>2</sub> 薄膜对光的吸收率较差,入射光将会在 air/SiO<sub>2</sub> 薄膜界面和 SiO<sub>2</sub> 薄膜/Si 基底界面上发生多次反射<sup>[10]</sup>。其中,  $r_{01}$  为空气与 SiO<sub>2</sub> 界面的反射系数,  $r_{10}$  为 SiO<sub>2</sub> 与空气界面的反射系数,  $r_{12}$  为 SiO<sub>2</sub> 与 Si 界面的反射系数,  $t_{01}$  为空气与 SiO<sub>2</sub> 界面的折射系数,  $t_{10}$  为 SiO<sub>2</sub> 与空气界面的折射系数,  $t_{12}$  为 SiO<sub>2</sub> 与 Si 界面折射系数,  $r_{012}$  为整个薄膜层结构的反射系数。由于各级反射光束之间存在光强大小差异,所以仅考虑主光束和第二光束之间的干涉。令主光束和第二光束之间的相位差为  $\alpha$ , 则有:

$$\alpha = 4\pi dn_1/\lambda \quad (1)$$

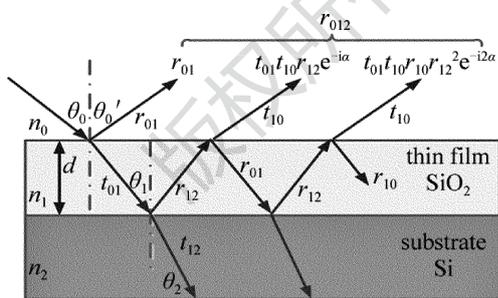


Fig. 1 Reflection model of thin film

结合菲涅耳对薄膜模型的建模公式<sup>[10]</sup>,可以得到 SiO<sub>2</sub> 薄膜对  $p$  光和  $s$  光的振幅反射系数分别为:

$$r_{012,p} = \{ (n_1 - n_0)/(n_1 + n_0) + [(n_2 - n_1)/(n_2 + n_1)] \exp(-i\alpha) \} / \{ 1 + [(n_1 - n_0)/(n_1 + n_0)] \cdot [(n_2 - n_1)/(n_2 + n_1)] \exp(-i\alpha) \} \quad (2)$$

$$r_{012,s} = \{ (n_0 - n_1)/(n_0 + n_1) + [(n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)] \exp(-i\alpha) \} / \{ 1 + [(n_0 - n_1)/(n_0 + n_1)] \cdot [(n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)] \exp(-i\alpha) \} \quad (3)$$

进一步计算得到 SiO<sub>2</sub> 薄膜对  $p$  光和  $s$  光的反射率分别为:

$$R_p = |r_{012,p}|^2, R_s = |r_{012,s}|^2 \quad (4)$$

上述公式都是菲涅耳描述薄膜结构对偏振光的反射作用,但在紧凑型薄膜测厚仪中,入射光和出射光均为非偏振光,则有 SiO<sub>2</sub> 薄膜的反射率为:

$$R = (R_p + R_s)/2 \quad (5)$$

SiO<sub>2</sub> 薄膜的反射率  $R$  仅是波长  $\lambda$  和薄膜厚度  $d$  的超越函数,因而需借助逆问题求解思想计算薄膜厚度<sup>[11]</sup>。在上述理论模型中,不仅计算待测 SiO<sub>2</sub> 样件的反射率  $R$ ,还需计算参考 SiO<sub>2</sub> 样件的反射率  $R'$ ,该参考样件厚度为  $d$ ,那么理论反射率之比如下为:

$$f_0(\lambda, d) = R/R' \quad (6)$$

在实际测量过程中,将通过紧凑型薄膜测厚仪测量出待测样件和参考样件的反射光强,分别是  $I_s(\lambda)$  和  $I_r(\lambda)$ ,假定仪器的暗噪声为  $I_b(\lambda)$ ,则测量所得反射光强之比可由下式来描述:

$$f_1(\lambda) = [I_s(\lambda) - I_b(\lambda)]/[I_r(\lambda) - I_b(\lambda)] \quad (7)$$

将上述模型计算出的薄膜反射率之比  $f_0(\lambda, d)$ ,与紧凑型薄膜测厚仪所测得的反射光强之比  $f_1(\lambda)$  做非线性拟合,不断调整  $d$  使得设定的评价函数中残差平方和 (residual sum of squares, RSS)  $\delta$  取最小值 ( $f_0(\lambda_i, d)$  是  $f_0(\lambda, d)$  的离散化值,  $f_1(\lambda_i)$  是  $f_1(\lambda)$  的离散化值,  $n$  为采集波长点数),此时理论计算中采用的薄膜厚度值  $d$  就是该薄膜厚度的测量值。

$$\delta = \sum_{i=1}^n [f_1(\lambda_i) - f_0(\lambda_i, d)]^2 \quad (8)$$

基于上述原理设计的数据处理流程如图 2 所示,利用紧凑型薄膜测厚仪测得的待测样件与参考样件反射光强之比与由薄膜传输矩阵计算得到的理论反射率之比做非线性拟合,通过评价函数 RSS 判断求取薄膜厚度。本文中采用 Levenberg-Marquardt 算法做参量反演<sup>[12]</sup>,此算法是梯度下降法与高斯牛顿法的结合,一般用于解决形如上述系统模型的非线性最小二乘问题<sup>[13]</sup>,具有收敛快、鲁棒性好、求解精度高等优点<sup>[14]</sup>。

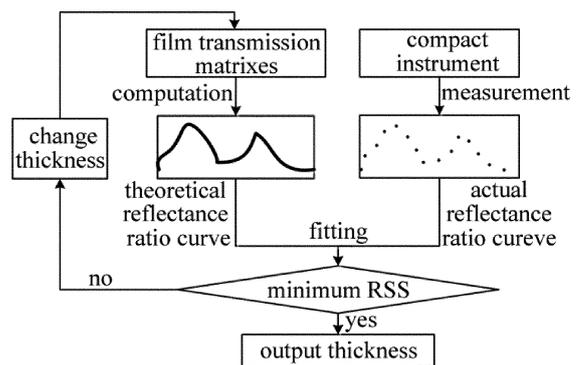


Fig. 2 Flow chart of data processing of a compact spectral thickness measurement instrument for thin film

## 2 仪器设计与实现

结合系统原理和数据处理算法,作者研制了一台紧凑型薄膜测厚仪原型系统。该仪器原理结构组成如图 3a 所示,原型系统如图 3b 所示。

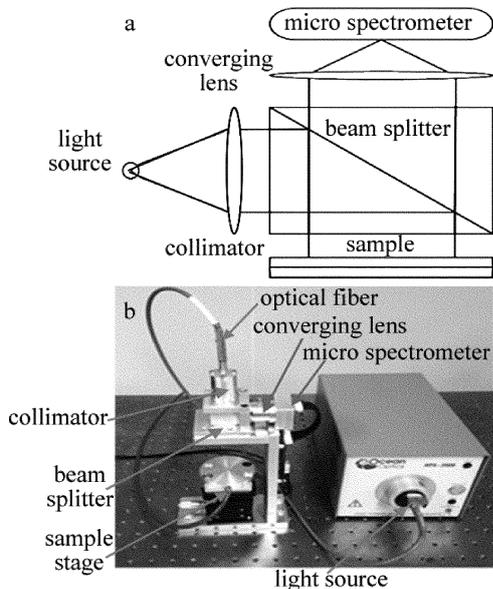


Fig. 3 Schematic diagram and prototype system of a compact spectral thickness measurement instrument for thin film

如图 3a 所示,紧凑型光谱薄膜测厚仪光路由光源、准直镜、分束器、会聚透镜和微型光谱仪等组成。其中,点光源结合准直镜产生可见波段光谱范围的平行光束,经透反比为 1:1 的分束器反射到样品表面,由样品表面所反射的反射光透过分束器,会聚进入微型光谱仪中。该微型光谱仪采集可见波段范围内的反射光谱,并通过模数转换电路输出到计算机中,从而完成测量。根据此参考光路原理图而搭建的紧凑型薄膜测厚仪原型系统如图 3b 所示,其所采用元器件基本信息见表 1。

Table 1 Parameter information of optical elements

components and its model	specification
light source DH20000BAL	wavelength: 210nm ~ 1700nm
beam splitter BSC0120-4	cube side length: 20mm
collimator CaF2	focal length: 25mm; diameter: 12.7mm
converging lens CaF2	focal length: 25mm; diameter: 12.7mm
micro spectrometer C10988MA	detecting bands: 380nm ~ 750nm
optical fiber QP600-1-SR	600mm UV

该原型系统不仅实现了理论光路的搭建,还增加了可吸附式样品台以保证样件的正常测量。通过选用微型光谱仪 C10988MA,可探测光谱范围为 380nm 到 750nm,近似覆盖整个可见波段。不考虑氙灯光源和计算机的尺寸,整个原型系统尺寸为 146mm × 66mm × 214mm,比一张 A4 纸的尺寸还小,微型光谱仪尺寸为 17mm × 28mm × 13mm,光路为 100mm × 50mm ×

95mm,和成年人手掌相仿。在测量过程中,原型系统对任意样件的单次测量时间取决于微型光谱仪的积分时间,一般小于 70ms,而采用 Levenberg-Marquardt 算法作数据处理时间仅为 35s。该薄膜测厚仪结构紧凑、测量时间快速,有利于在空间有限的工业生产线上安装,从而实现在线测量。

膜厚测量过程步骤如下:(1)当光源稳定后,测量仪器的暗噪声,暗噪声由光路中的杂散光光强值和微型光谱仪的暗噪声值组成;(2)测量已知膜厚的标准参考样件的反射光强值;(3)测量待测样件的反射光强值。在采集完成之后,将在计算机中借助 MATLAB 程序完成数据处理并求取薄膜厚度。

## 3 实验与分析

为了检验紧凑型薄膜测厚仪的测量准确性,采用在 Si 基底上生长的 SiO<sub>2</sub> 薄膜作为测量对象。以 110nm SiO<sub>2</sub> 薄膜为参考样件,以名义值为 343nm SiO<sub>2</sub> 薄膜作为待测样件。在实际测量之前,作者将紧凑型薄膜测厚仪理论模型计算所得 110nm 参考样件绝对反射率与武汉颐光科技有限公司生产的宽光谱穆勒矩阵椭偏仪 ME-L 采用的理论模型计算所得的 110nm 参考样件绝对反射率进行对比,结果如图 4 所示。其中,单点最大偏差值仅为  $8.0 \times 10^{-13}$ ,而两反射率曲线偏差平方和仅为  $2.9 \times 10^{-11}$ ,验证了紧凑型薄膜测厚仪理论模型的准确性。

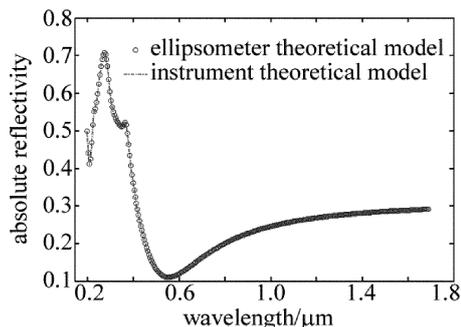


Fig. 4 Comparison of theoretical absolute reflectivity of 110nm reference sample

在理论模型准确性验证条件之下,在待测样件上选取不同测量点进行测量,发现反射光谱基本一致,说明样件比较均匀,且仪器重复性良好。在微型光谱仪不同积分时间和反复放置测量样件等条件下,对待测样件表面中心区域(直径约为 20mm)任意测量点重复测量 10 次,膜厚测量结果如表 2 所示。

测量不确定度是测量结果的一个重要评价参量<sup>[15]</sup>,本文中采用测量结果的标准差作为标准不确定度,标准差采用贝塞尔公式求取<sup>[16]</sup>。上述 10 组数据的平均值为 343.2nm,标准差为 0.13nm,也就是标准

Table 2 10 measurements by compact instrument for thin film thickness measurement

serial numbers of measurement	1	2	3	4	5
thickness/nm	343.0	343.1	343.2	343.1	343.3
serial numbers of measurement	6	7	8	9	10
thickness/nm	343.2	343.4	343.3	343.2	343.3

不确定度值为 0.13nm,因此用紧凑型薄膜测厚仪测得薄膜厚度为  $t = (343.2 \pm 0.13) \text{ nm}$ 。采用武汉颐光科技的宽光谱穆勒矩阵椭偏仪 ME-L 测量该薄膜结果为 341.6nm,那么该紧凑型薄膜测厚仪相对测量偏差小于 0.5%。

单次测量拟合结果见图 5,理论计算出待测样件与标准样件的反射率之比和实际测量的反射光强之比拟合较好,其最小残差平方和为 0.463。表 3 为在微型光谱仪同一积分时间 40ms 下反复放置条件下多次测量待测样件表面中心区域(直径约为 20mm)任意测量点的膜厚测量结果。由表 3 可知,同一测量条件下测量结果基本不变,说明紧凑型薄膜测厚仪重复性精度高。

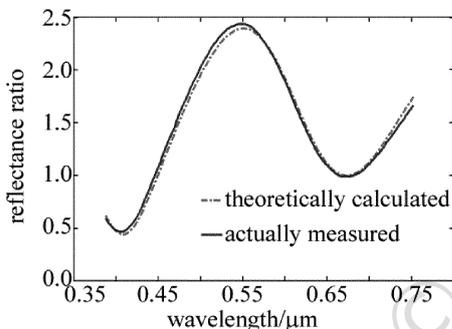


Fig. 5 Fitting result of single measurement

Table 3 Measurements under the condition of spectrograph with the same integration time

serial numbers of measurement	1	2	3	4	5
thickness/nm	343.3	343.3	343.3	343.3	343.3

### 4 结 论

本文中阐述了一种反射式紧凑型薄膜测厚仪,利用分束器实现共光路紧凑结构,选用垂直入射的平行光束作为测量光,采用反演计算求解薄膜参量,这样不仅极大地缩小了薄膜测厚仪的整体尺寸,并消除了测量结果对测量距离的敏感性。此外所采用的微型光谱仪可探测整个可见光波段,这将极大地提高测量结果准确性。通过对 SiO<sub>2</sub> 样件进行检测,紧凑型薄膜测厚仪的重复性测量精度良好,测量结果稳定可靠;其标准不确定度小于 0.15nm;将测量结果与穆勒矩阵椭偏仪测量结果作比对,两者测量结果相对偏差小于 0.5%;将测量结果与 SiO<sub>2</sub> 的名义值进行比较,两者相对偏差小于 0.06%,验证了该紧凑型薄膜测厚仪的测量准确

性与测量精度。同时,该薄膜测厚仪所具有的紧凑结构和对测量距离不敏感等优点,对仪器实现在线检测功能具有积极意义。

### 参 考 文 献

- [1] JI H Z, ZOU J J, CUI B S. An on-line accurate measurement method for nano film thickness[J]. Infrared, 2011, 32(7):9-16 (in Chinese).
- [2] MEN Z X, HE X, SUN F L. A simple method of optical film thickness measurement[J]. Vacuum, 2011, 48(5):32-34 (in Chinese).
- [3] LI K P, WANG D S, LI C, et al. Study on optical thin film parameters measurement method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(3):1048-1052 (in Chinese).
- [4] YANG T X, ZOU H, WANG L, et al. Determining the graded-index profiles of channel waveguides by prism coupling method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(3):689-695 (in Chinese).
- [5] LIU S Y, CHEN X G, ZHANG C W. Development of a broadband Mueller matrix ellipsometer as a powerful tool for nanostructure metrology[J]. Thin Solid Films, 2015, 584:176-185.
- [6] GUROV I, VOLYNKY M. White light microscopy for evaluating transparent films using switching model of overlapped fringes[C]// International Conference on Advanced Phase Measurement Methods in Optics and Imaging. New York, USA: American Institute of Physics (AIP) Publishing, 2010:295-300.
- [7] LAAZIZ Y, BENNOUNA Y, CHAHBOUN N, et al. Optical characterization of low optical thickness thin films from transmittance and back reflectance measurements[J]. Thin Solid Films, 2000, 372:149-155.
- [8] HALL J F, Jr, FERGUSON W F C. Optical properties of cadmium sulfide and zinc sulfide from 0.6 micron to 14 micron[J]. Journal of the Optical Society of America, 1955, 45(9):714-720.
- [9] JING L K, JIANG Y R, NI T. Application of adaptive simulated annealing genetic algorithm in inverse of optical constants and thickness of the thin film[J]. Optical Technique, 2012, 38(2):218-222 (in Chinese).
- [10] FUJIWARA H. Spectroscopic ellipsometry: principles and applications[M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2007:43-48.
- [11] CHADAN K, COLTON D, PAIVARINTA L, et al. An introduction to inverse scattering and inverse spectral problems[M]. Philadelphia, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1997:83-85.
- [12] ZHANG C W, LIU S Y, SHI T L, et al. Improved model-based infrared reflectometry for measuring deep trench structure[J]. Journal of the Optical Society of America, 2009, A26(11):2327-2335.
- [13] ZHOU T Y, YANG K Y, WU S Y. Determination of optical constants and thicknesses of high-reflection multilayer system[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(1):128-132 (in Chinese).
- [14] ZHENG R T, NGO N Q, BINH L N, et al. Two-stage hybrid optimization of fiber Bragg gratings for design of linear phase filters[J]. Journal of the Optical Society of America, 2004, A21(12):2399-2405.
- [15] HESSELING J P. A novel method of evaluating dynamic measurement uncertainty utilizing digital filters[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(5):1-11.
- [16] CHEN H Y, CAO Y, HAN J. Evaluation of uncertainty in measurement based on a Monte Carlo method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(4):301-308 (in Chinese).