

基于椭圆光谱和光杠杆法的薄膜厚度及曲率测量系统设计

孙 伟¹, 金尚忠^{1*}, 张 殷², 孙紫娟², 徐 胜²

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310018; 2. 苏州岚创科技有限公司, 江苏 苏州 215004)

摘要: 在密集波分复用系统中使用窄带滤光片进行工艺调试时, 需要对单层薄膜的厚度、厚度分布以及残余应力等参数进行测量。针对当前需采用多个系统测量时的复杂性及重复定位而引入误差的问题, 设计了一种基于椭圆光谱和光杠杆法的薄膜厚度及曲率测量系统。该系统在椭圆光谱测量的基础上引入光杠杆法, 成功地在集成设备上实现了对上述多种参数的精确测量。实验结果表明: 与 RC2 型椭圆仪、ZYGO 激光干涉仪测量结果相比, 所设计的测量系统测得的薄膜厚度偏差小于 0.21%, 厚度分布偏差值小于 0.025%, 曲率和残余应力偏差均在 $\pm 1^\circ$ 以内, 系统能够统满足实际的测量需求。

关键词: 光学检测; 椭圆光谱; 光杠杆法; 基片曲率法; 残余应力

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)01-0094-07

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.01.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of film thickness and curvature measurement system based on ellipsometry spectrum and optical lever method

SUN Wei¹, JIN Shangzhong^{1*}, ZHANG Yin², SUN Zijuan², XU Sheng²

(1. College of Optical and electronic technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Suzhou Peaktra Technology Co., Ltd., Suzhou Jiangsu 215004, China)

Abstract: In the dense wavelength division multiplexing system, when adjusting the process using a narrowband filter, it is necessary to measure the thickness, thickness distribution, and residual stress of a single layer of film. To solve the complexity and repeated positioning errors introduced by the need to use multiple systems for measurement, a measurement system based on ellipsometry spectrum and the optical lever method is introduced, which successfully achieved precise measurement of these parameters on a single integrated device. The experimental results show that the thickness deviation measured by the designed measurement system is less than 0.21%, the thickness distribution deviation is less than 0.025%, the curvature and the residual stress deviation is within $\pm 1^\circ$. The system can meet the actual measurement needs.

Key words: optical inspection, ellipsometry spectrum, optical lever method, substrate curvature method, residual stress

0 引言

光学薄膜被广泛应用于高性能光学器件、集成电路^[1]、生物材料^[2]、太阳能电池^[3]等多个领域。在器件表面制备复杂的光学薄膜已成为提升器件性能的一种

有效手段。窄带滤光片在密集波分复用(DWDM)系统中被广泛应用, 并且随着光通信技术的发展, 对其需求也在不断增长。然而, 目前该滤光片的国产化进程进展缓慢, 主要原因有: 一是制备效率较低, 导致制造成本较高; 二是缺乏能够在工艺调试中满足测量需求的测量系统。目前, 测量薄膜的多个参数通常需要使用多个测量系统, 这会引入额外的测量误差, 增加测量的时间和复杂程度。因此, 设计一个能够同时进行参数测量, 且准确高效的测试系统是十分必要的^[4-5]。

为了避免测量薄膜厚度过程中因操作不当对薄膜造成不可逆的损伤, 研究人员主要采用非接触式的

收稿日期: 2024-02-06。

作者简介: 孙伟(2000—), 男, 安徽淮北人, 硕士研究生, 现就读于中国计量大学光学与电子科技学院光学工程专业, 主要从事相关薄膜测量系统、光学监控系统的设计, 以及 WDM 系统中窄带滤光片的制备的工艺研究工作。

*** 通信作者:** 金尚忠(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光学计量方面的研究。



光学测量方法。其中,椭圆偏振光谱测量^[6]通过分析待测样品反射光的偏振态来获得椭圆偏参数,并利用拟合算法求解出薄膜的厚度和光学常数^[7]。而旋转检偏器-固定检偏器(RA-FA)结构^[8]则具有转动部件少、无色差、数据处理简便的特点,可以直接与光谱测量相结合,通过光纤引入宽光谱光源,并通过光谱仪实时获取光谱数据,进而计算出薄膜的厚度及其分布情况。

在薄膜残余应力测量方面,虽然已经有干涉法、X射线法和核超精细结构效应法等多项研究和技术尝试^[9-11],但这些方法在实际应用中都存在一定的局限性^[12],例如系统组成较为复杂,难以集成。与之不同的是,基片曲率法^[13]可以通过镀膜前后薄膜厚度和曲率的变化来计算残余应力。

由于多个设备测量会使测量过程变得复杂并且引入测量误差,所以本文以基片曲率法为依据,设计一种基于椭圆偏振光谱和光杠杆法的薄膜厚度及曲率测量系统。

1 系统组成与测量原理

薄膜厚度及曲率测量系统结构原理框图如图1所示。该系统由椭圆偏振光谱测量系统和激光曲率测量系统两部分构成,载物台呈水平放置,整个系统设计为立式反射结构。

1.1 椭圆偏振光谱测量系统

光束经过由2个消色差透镜、孔径光阑和偏振棱镜组成的准直系统后,在待测样品上形成一个长轴为3 mm、短轴为1 mm的椭圆形光斑。由于薄膜制备后可能存在残余应力,导致薄膜表面有一定的曲率变化,这会导致反射光束产生微小的角度偏移。尽管这种角度变化对薄膜厚度测量的影响可以忽略不计,但由于光纤的数值孔径有限,只能接收一定范围内的光线。为了消除这一

微小角度变化带来的影响,在光纤前端选用了具有较大焦距的消色差透镜作为耦合透镜,以控制进入光纤端面光线的角度。

测量原理如下:当各个偏振器件的光轴固定时,p分量和s分量的光在通过偏振器件时会与光轴正交,但是并不会影响整体光强的最大值,所以在不考虑吸收的情况下,仍可以将经过薄膜反射后的反射率表示为

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos \delta}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos \delta} \quad (1)$$

其中, r_1 和 r_2 分别为薄膜上表面和下表面的反射系数, δ 为光程差,且当 $\delta = 2k\pi$ 时(k 为非零自然数),出现极值点,即出现一级干涉峰。因此,厚度与干涉峰对应波长的关系为

$$d_0 = \frac{\lambda_0}{2n} \Rightarrow \Delta d = \frac{\Delta \lambda}{2} \quad (2)$$

其中, d_0 是测量得到的厚度基准, n 为折射率, Δd 为厚度变化量, λ_0 为初始光强对应的波长, $\Delta \lambda$ 为峰值光强对应的波长变化。假设测量过程中薄膜折射率不变,当改变入射光位置时,若薄膜厚度发生改变^[14],则

$$\Delta d = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} d_0 \quad (3)$$

因此,可以通过测量光谱光强的变化得到薄膜的相对厚度变化,椭圆偏振光谱测量流程如图2所示。在实际测量中,首先采用椭圆偏振光谱测量技术来确定薄膜监

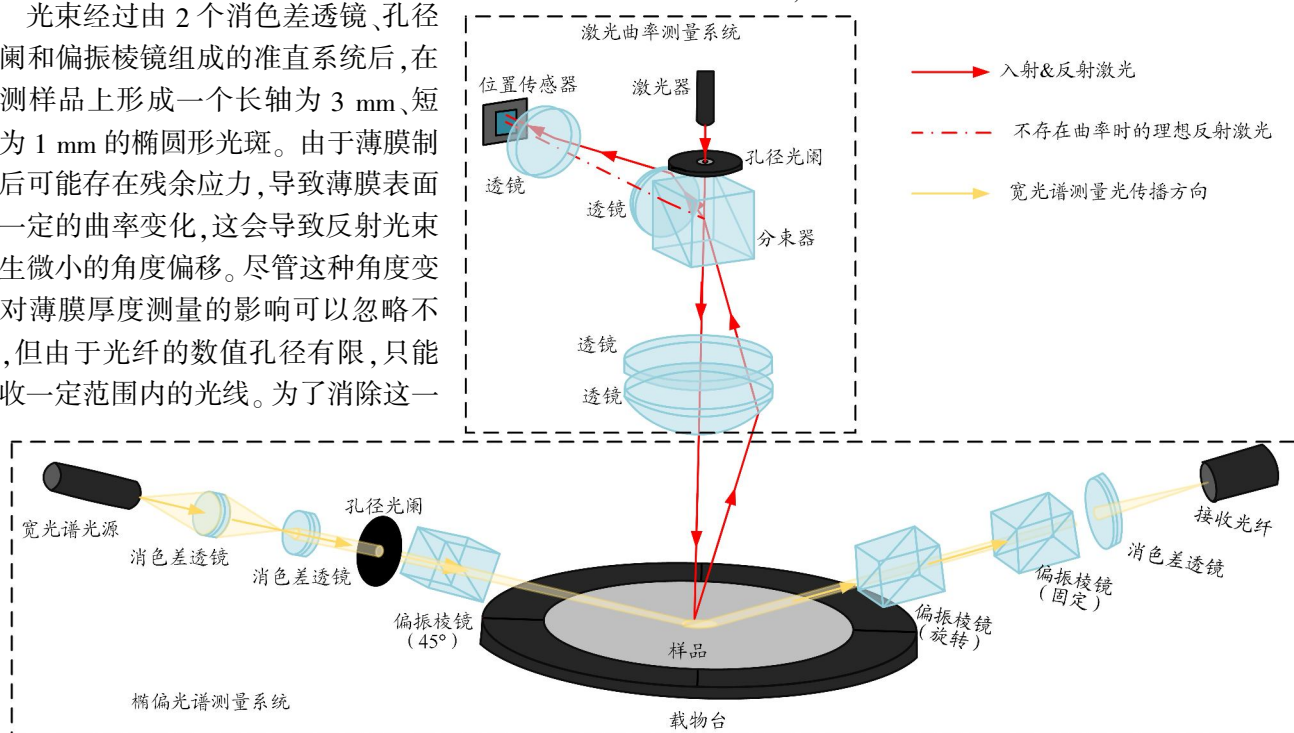


图1 薄膜厚度及曲率测量系统结构原理框图

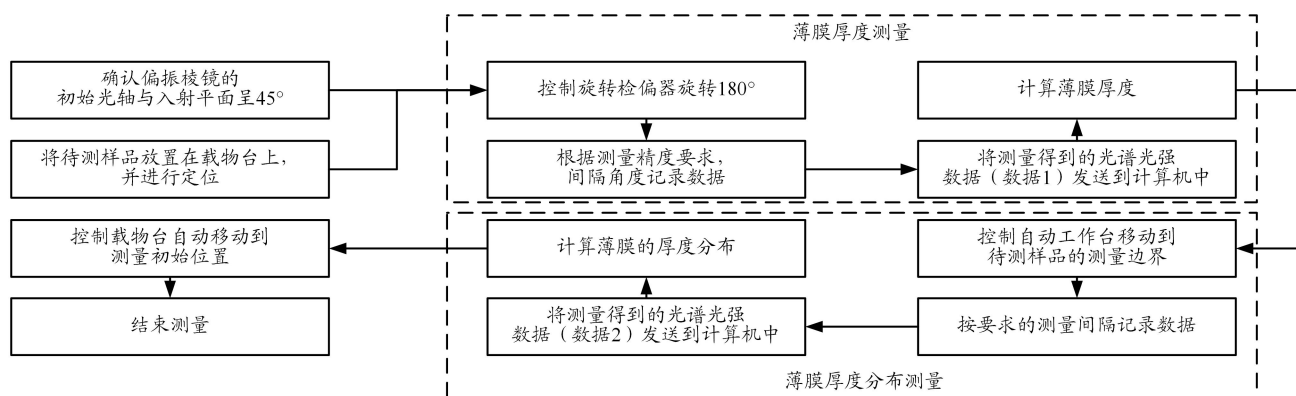


图2 椭圆偏振光谱测量流程

控点的厚度。其次,固定旋转偏振器,并改变入射光在薄膜上的位置,从而获得不同位置处薄膜的反射光谱。然后,将这些光谱分别与监控点位置的光谱进行对比,通过计算得到光谱中多个峰值波长的变化。接着,将这些变化值代入式(3),即可得到薄膜厚度的相对变化。最后,测量系统通过逐点扫描的方式,最终可以获得薄膜的厚度分布。

1.2 激光曲率测量系统

1.2.1 光杠杆法测量原理

采用椭圆偏振光谱测量时,需要让入射光以特定角度入射。测量之前,必须确认载物台的水平性,并对所有相关器件进行校准。

光杠杆法原理图如图3所示。通过电机驱动待测样品沿直径方向匀速移动,样品的曲率变化会导致反射光与入射光之间形成一定的角度偏差。当移动单位距离 Δx 后,由于探测器上的移动距离变化 ΔD 远小于光程 L ,故待测样品移动产生的角度变化 $\Delta\theta \approx \Delta D/L$,对应的弧切角变化 $\Delta\alpha = \Delta\theta/2 = \Delta D/(2L)$ 。根据弧长公式,可以推导出样品的曲率半径为

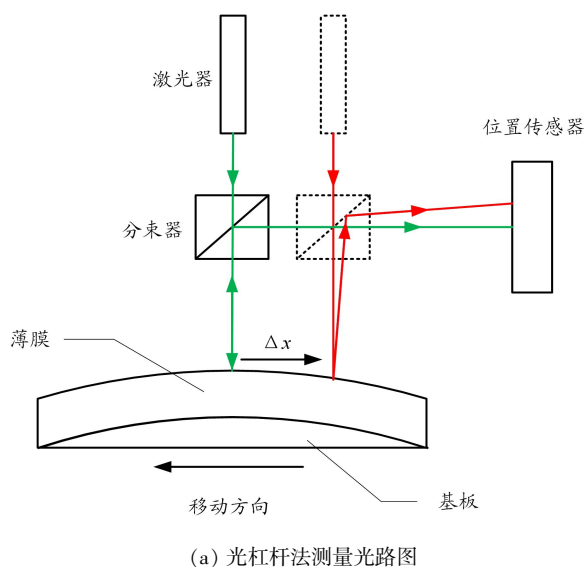
$$w = \frac{\Delta l}{\Delta\alpha} \approx \frac{\Delta x}{\Delta\alpha} = \frac{2L\Delta x}{\Delta D} \quad (4)$$

其中, Δl 为对应的移动单位距离的弧长。式(4)表明,薄膜的曲率半径与单位移动距离、测量光路长度和位置传感器上相邻光束的距离有关,后续的设计中也基于此实现薄膜的曲率测量。在实际测量过程中,需要首先测量出基片初始的曲率,然后在该基片上镀膜,并测量镀膜后的曲率。根据文献[15]可知,在薄膜的基片参数和薄膜厚度已知的情况下,薄膜的残余应力仅与镀膜前后的曲率变化相关,故当采用椭圆偏振光谱测量得到薄膜厚度时,即可计算得到薄膜的残余应力。

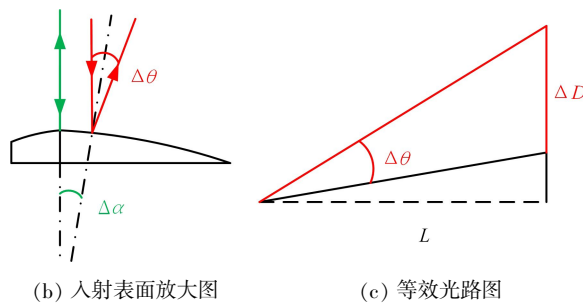
1.2.2 曲率测量原理

本文利用光杠杆法设计激光测量系统实现对薄

膜的曲率测量。曲率测量光路图如图4所示。



(a) 光杠杆法测量光路图



(b) 入射表面放大图

(c) 等效光路图

图3 光杠杆法原理图

首先,光束通过分束器和薄膜样品间的2个正透镜组合后均会入射到分束器中心;然后,光束通过分束器和位置敏感器件(PSD)间的正负透镜组合后,沿平行方向入射到PSD上。由于薄膜样品和PSD分别在分束器的竖直和水平轴线上,所以2种情况下的反射光束经过分束器反射后入射到透镜3上时,对应透镜2的像方孔径角 θ_2' 和对应透镜3的物方孔径角 θ_3 相等,即 $\theta_2' = \theta_3$ 且 $\alpha_2' = \alpha_3$ 。

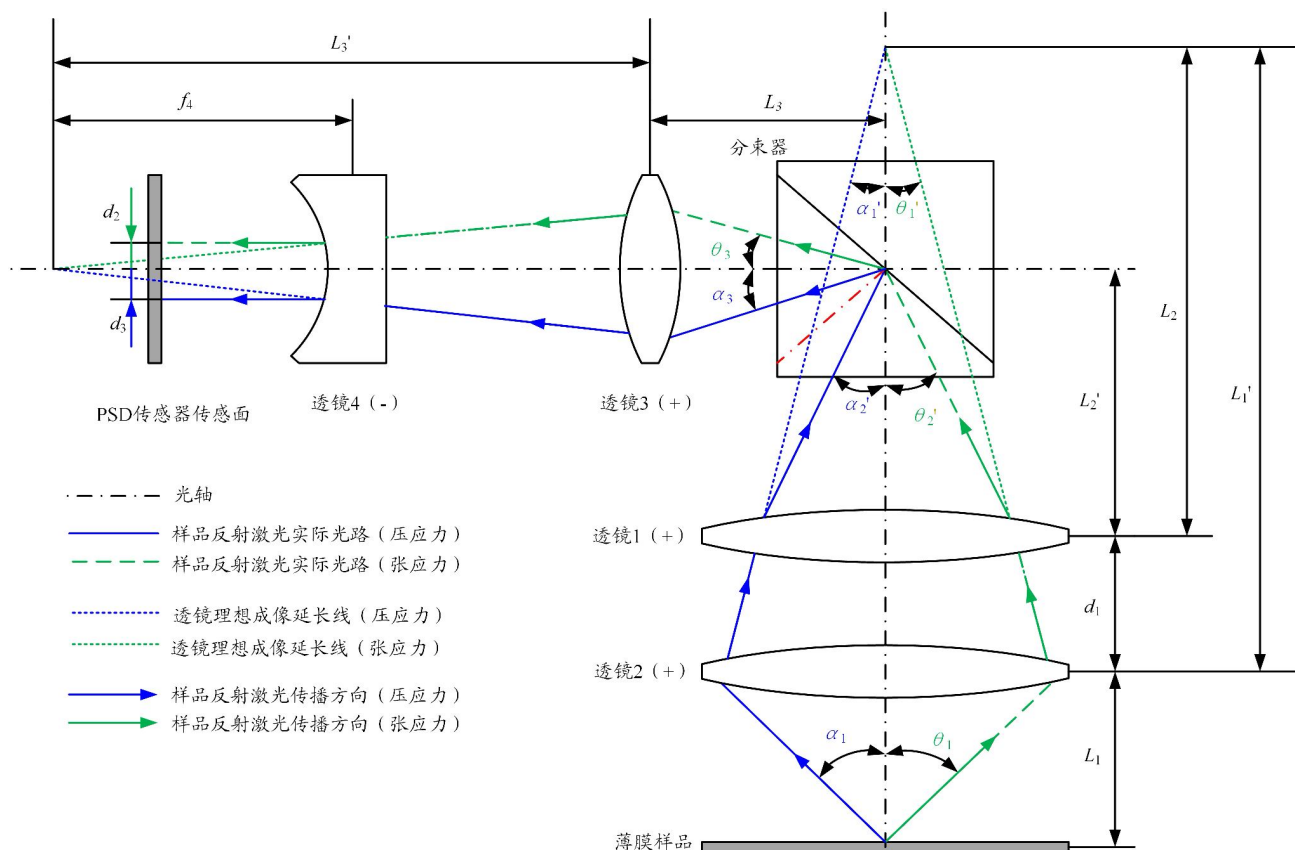


图4 曲率测量光路图

当入射光束在薄膜表面移动时,有

$$\Delta\alpha = \theta_1 - \theta_{1x} = \left(\frac{d_2 f_1 f_2 f_3}{f_4 \cdot (L_3 + f_3) \cdot ((f_2 - d_1) \cdot (f_1 + L_1) + f_1 L_1)} \right) - \arctan \left(\frac{d_{2x} f_1 f_2 f_3}{f_4 \cdot (L_3 + f_3) \cdot ((f_2 - d_1) \cdot (f_1 + L_1) + f_1 L_1)} \right) \quad (5)$$

其中, f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 分别是透镜 1、透镜 2、透镜 3、透镜 4 的焦距, d_1 是透镜 2 与透镜 1 之间的距离, d_2 是入射光距离 PSD 中心的距离, θ_1 是透镜 1 的物方孔径角, L_1 、 L_3 分别是透镜 1、透镜 3 的物距, θ_{1x} 和 d_{2x} 分别是光束在薄膜上移动 Δx 后的反射角和 PSD 上光束位置距离 PSD 中心的距离。将式(5)代入式(4),即可得到光束在薄膜表面移动 Δx 后,薄膜曲率和光束在 PSD 上移动距离的关系。

2 系统校准

系统校准过程如图 5 所示。在进行载物台校准时,激光器发射出的准直激光入射到带有反射面的载物台表面。反射光随后通过折转透镜组和分束器,并最终到达位置传感器。如果载物台与入射光不垂直,那么位置传感器接收到的信号将会偏离中心点。依据

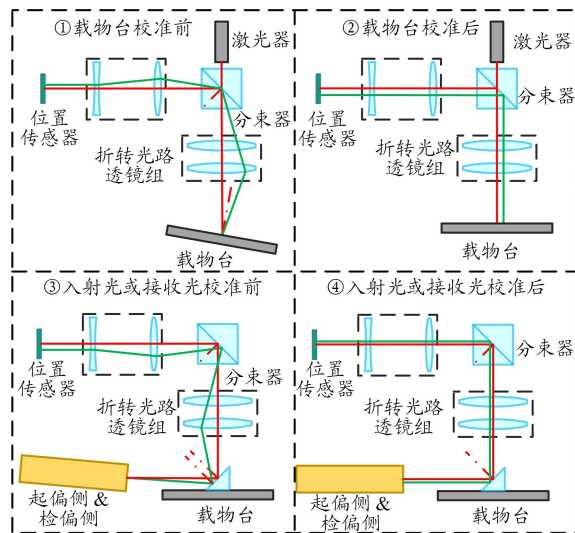


图5 系统校准过程图

位置传感器上的光束位置,调整载物台的角度以确保其与入射光垂直,从而完成校准。一旦载物台校准完毕,将入射光和接收光均调整至水平位置。为此,在设计时应预留空间用于两侧安装激光器。在校准好的载物台上放置一个直角反射镜后,可以通过上下移动载物台来找到最佳校准位置。此外,还可以通过微调入射光和接收光的位置进一步优化校准效果。

3 系统结构设计

系统结构设计图如图6所示。在搭建好系统后,首先需要对入射角度进行定标。为此,将两侧装置均调整至水平位置,激光发出的光束经由三棱镜反射,最终到达椭圆光谱测量仪的2个接收端。为了实现精确的角度标定,本文设计了一套手动入射角度调节结构,用于微调两侧的角度,并通过两侧的夹块固定角度,确保其稳定性。此过程基于空气定标的原理,用于确定偏振棱镜的光轴方向。

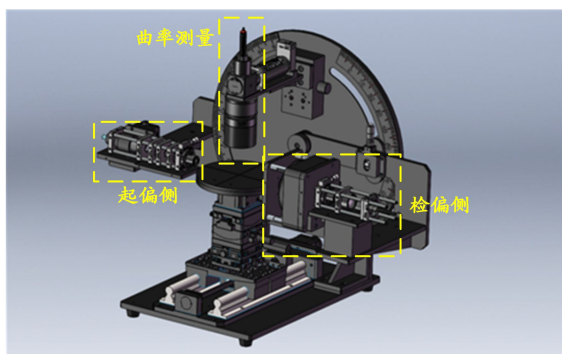


图6 结构设计图

在实际测量中,根据待测材料的不同特性,需要调整测量角度^[16]。因此,本文在设计中加入了刻度线,以辅助用户设置入射角度,并利用游标卡尺的原理,确保角度调整的精度可达 0.1° 以上。此外,考虑到不同样品的需求,载物台采用了分体式结构,其台面可根据具体样品的要求变换形状和形式,以便更好地固定和定位样品。同时,载物台还具备旋转功能,能够满足薄膜样品在不同轴线上的测量需求。

4 实验验证

本文根据设计结果搭建了实验装置,实物图如图7所示。

4.1 厚度及厚度分布测量验证

本文采用苏州岚创科技有限公司设计的磁控溅射系统,在标准硅片基底上制备了待测样品的 SiO_2 薄膜。制备完成后,首先采用美国J.A.Woollam公司的RC2型椭圆偏仪对其进行测量,然后采用本设计系统对其进行测量,并进行比较,结果如图8所示。

从图8(a)可以看出,RC2测量得到薄膜厚度均值为 104.051 nm ,设计系统测量均值为 104.062 nm ,测量的厚度偏差为 0.011 nm ;从图8(b)可以看出,2个系统测得的最大偏差为 0.21% ,平均偏差为 0.17% ,满足测量时的薄膜精度需求;从图8(c)可以看出,测量方式与计算方式得到的薄膜分布相似,由于设计系统

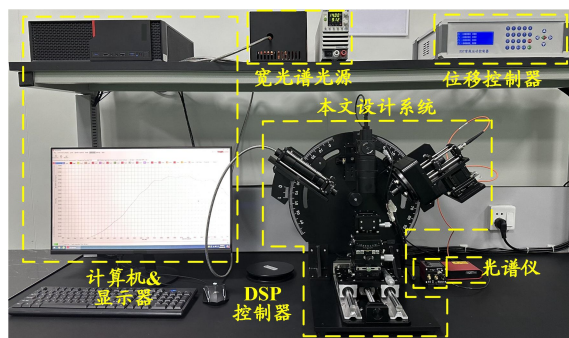
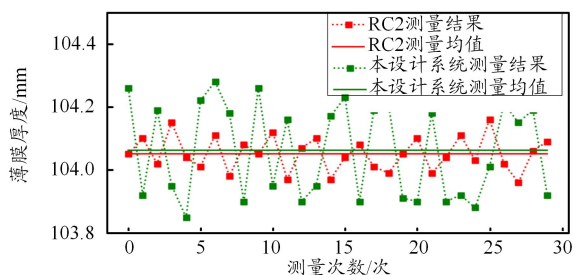
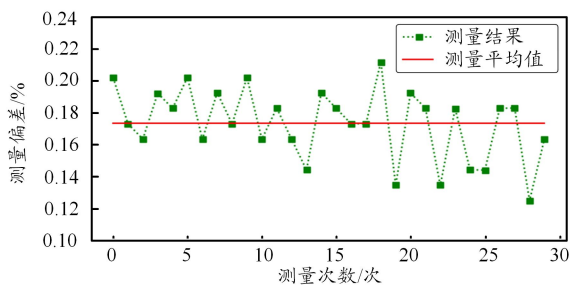


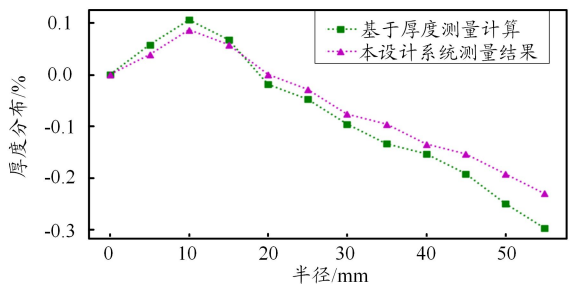
图7 实验装置实物图



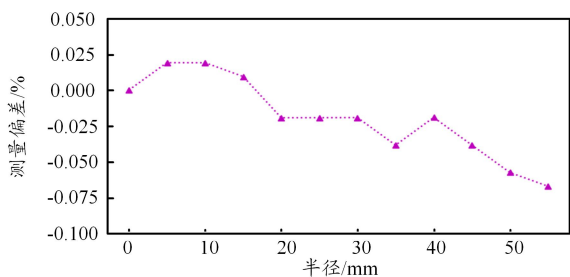
(a) 厚度重复测量



(b) 薄膜厚度测量偏差



(c) 薄膜厚度分布测量



(d) 薄膜厚度分布测量偏差

图8 厚度及厚度分布测量

表 1 曲率及残余应力测量结果

SiO ₂ 薄膜 直径/mm	样品序号	测量方向	ZYGO 测量 曲率/mm	本设计系统 测量曲率/mm	测量偏差/%	ZYGO 计算 残余应力/Mpa	本系统计算 残余应力/Mpa	测量偏差/%
120	1	X 轴	3 491	3 466	-0.72	2 464	2 482	-0.73
		Y 轴	4 289	4 318	0.68	2 006	1 992	0.70
	2	X 轴	4 097	4 131	0.84	2 100	2 082	0.81
		Y 轴	3 762	3 744	-0.47	2 287	2 298	-0.48
220	3	X 轴	3 558	3 581	0.65	2 418	2 402	0.66
		Y 轴	3 272	3 290	-0.55	2 628	2 615	-0.53
	4	X 轴	5 075	5 029	-0.89	1 695	1 771	-0.88
		Y 轴	4 122	4 143	0.52	2 087	2 077	0.48

的积分区域相对增加,厚度分布测量结果表征的均匀性更好;从图 8(d)可以看出,测量得到的薄膜分布的最大偏差为 0.025%,符合测量厚度的许可偏差。

4.2 曲率测量验证

本文在标准硅片上制备了 4 个 SiO₂ 薄膜样品,其直径分别为 120 mm 和 220 mm(2 种尺寸各 2 个)。制备前,使用本设计系统和 ZYGO 激光干涉仪分别测量了硅片的曲率。硅片的参数 $E_s/(1-\nu_s)=1.802\times 10^{11}$ Pa(其中 E_s 为硅片的杨氏模量, ν_s 为泊松比),Si 片厚度为 0.5 mm。通过测量得知, SiO₂ 薄膜的厚度为 1.450 μm , 测量及计算结果如表 1 所示。可以看出,本设计系统对单层薄膜的曲率测量偏差在 $\pm 1\%$ 以内,且计算得到的残余应力的测量偏差也在 $\pm 1\%$ 以内。

除此之外,本文使用了 ZYGO 激光干涉仪和自行设计的测量系统,对 100 GHz DWDM 滤光片的曲率进行了对比测量,测量结果如表 2 所示。可以看出,本设计系统的测量结果与 ZYGO 激光干涉仪的测量值之间的偏差控制在 $\pm 1\%$ 以内。这表明本设计系统具有较高的测量精度,能够满足实际应用需求。

表 2 2 种方法的 DWDM 滤光片的曲率测量结果对比

样品序号	ZYGO 测量 结果/mm	设计系统 测量结果/mm	相对 偏差/%
1	571.45	565.96	0.96
2	585.64	589.82	-0.71
3	592.73	597.57	-0.81
4	598.21	593.05	0.86
5	608.69	612.26	-0.57
6	657.14	652.72	0.67
7	692.32	695.15	-0.41
8	732.57	735.38	-0.38

5 结束语

本文针对 DWDM 系统中窄带滤光片制备和工艺调试中的测量需求,通过对椭圆偏光谱测量原理和光杠杆法的分析,建立了测量系统的理论模型,研究验证了基于椭圆偏光谱和光杠杆法的薄膜测量系统技术的可行性。该系统可以同时测量薄膜膜厚、厚度分布以及曲率。实验结果表明:系统的厚度测量偏差小于 0.21%,薄膜厚度分布测量偏差小于 0.025%;与 ZYGO 激光干涉仪测量进行对比测试,曲率半径测量偏差以及计算得到的残余应力的偏差均在 $\pm 1^\circ$ 以内。该系统满足了在生产应用中对薄膜的测量需求,解决了目前测量薄膜的复杂性问题,是一种对薄膜多个参数同时测量的创新性设计。但目前完成一次完整的测量仍需要一定的时间。因此,下一步的重点研究内容是进一步缩短测量时间、提高测量精度、拓展测量系统的应用范围。

参考文献:

- [1] 宋国志. 宽光谱椭圆偏仪在集成电路中的研究与应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [2] ALSHAMMARI A, VAN ZALINGE H, SANDALL I. In Situ monitoring of aptamer-protein binding on a ZnO surface using spectroscopic ellipsometry[EB/OL]. [2024-02-06]. https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Aged%3A14%3A17537790/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Acrawler&id=ebsco%3Adoi%3A10.3390%2Fs23146353&link_origin=none.
- [3] LI C, TU H T, ZHENG Y X, et al. Research on spectroscopic ellipsometry in China with future challenges[J]. Thin Solid Films, 2023, 764: 139593-1-139593-12.
- [4] ABADIAS G, CHASON E, KECKES J, et al. Review article: stress in thin films and coatings: current status, challenges, and prospects[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2018, 36(2): 020801-1-020801-48.
- [5] 张哲浩, 吕建国, 江庆军, 等. 薄膜厚度和溅射功率对有机衬底上 ZnO: Ga 薄膜应力的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2016, 34(3): 348-352, 366.
- [6] BORDOVALOS A, SUBEDI B, CHEN L, et al. Implications of electron transport layer and back metal contact variations in tin-lead perovskite solar

孙伟,金尚忠,张殷,等:基于椭圆光谱和光杠杆法的薄膜厚度及曲率测量系统设计

- cells assessed by spectroscopic ellipsometry and external quantum efficiency[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(15): 19730–19740.
- [7] GARCIA-CAUREL E, DE MARTINO A, GASTON J P, et al. Application of spectroscopic ellipsometry and mueller ellipsometry to optical characterization[J]. Applied Spectroscopy, 2013, 67(1): 1–21.
- [8] 吴启宏. 光学薄膜非均匀性的实时椭圆偏振测量[J]. 光学学报, 1985(2): 157–62.
- [9] 王成, 张贵彦, 马莹, 等. 薄膜应力测量方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2004(9): 28–32.
- [10] 马一博, 陈牧, 颜悦, 等. 薄膜应力测量方法及影响因素研究进展[J]. 航空材料学报, 2018, 38(1): 17–25.
- [11] XU L, PEI Y C, WANG D P, et al. Analytical solutions for film stress and bending deformation of coated optical lenses[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 245: 108111–1–108111–11.
- [12] GUO J, FU H Y, PAN B, et al. Recent progress of residual stress measurement methods: a review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(2): 54–78.
- [13] 林晓坤. 晶圆薄膜应力测量系统设计与实现 [D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- [14] 姬弘楨, 邹娟娟. 一种用于检测薄膜均匀性的光谱方法[J]. 红外, 2011, 32(8): 1–7.
- [15] 安兵, 张同俊, 袁超, 等. 用基片曲率法测量薄膜应力[J]. 材料保护, 2003(7): 13–15.
- [16] 武月月, 弥谦. 椭圆法光学材料折射率测量精度分析[J]. 西安工业大学学报, 2018, 38(3): 214–218.