

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.11

基于光谱干涉椭偏法的薄膜厚度测量

张金旭, 陈家扬, 吴冠豪*

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 薄膜厚度的测量在芯片制造和集成电路等领域中发挥着重要作用。椭偏法具备高测量精度的优点, 利用宽谱测量方式可得到全光谱的椭偏参数, 实现纳米级薄膜的厚度测量。为解决半导体领域常见的透明硅基底上薄膜厚度测量的问题并消除硅层的叠加信号, 本文通过偏振分离式光谱干涉椭偏系统, 搭建马赫曾德实验光路, 实现了近红外波段硅基底上膜厚的测量, 以 100 nm 厚度的二氧化硅薄膜为样品, 实现了纳米级的测量精度。本文所提出的测量方法适用于透明或非透明基底的薄膜厚度测量, 避免了检测过程的矫正步骤或光源更换, 可应用于化学气相沉积、分子束外延等薄膜制备工艺和技术的成品的高精度检测。

关键词: 光谱干涉; 椭偏; 薄膜测量; 偏振分离

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2023)01-0122-06

Thickness measurement of thin films based on spectral interference ellipsometry

ZHANG Jinxu, CHEN Jiayang, WU Guanhao*

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,

Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Thickness measurement of the thin films is crucial for chip manufacturing and integrated circuits. Ellipsometry has the advantage of high measurement precision. The ellipsometry parameters of the full spectrum can be obtained by utilizing the broad spectrum measurement method to realize the thickness measurement of the nano-scale films. In order to solve the problem of film thickness measurement on the transparent silicon substrate which is often seen in the semiconductor field and eliminate the superimposed signal of the silicon layer, this paper proposed a polarization separation spectral interference ellipsometry system. A Mach-Zehnder interferometer was built to achieve the thickness measurement of the film on the silicon substrate in the near-infrared band. Taking the silica film with a thickness of 100 nm as the specimen, the measurement precision of nanometer scale was achieved. The method proposed in this paper is applicable to the thickness measurement of the thin films on transparent or opaque substrates, which avoids the correction steps in the detection process or the change of the incident wavelength. It can be used in the high-precision detection of the finished products of film preparation processes and technologies such as chemical vapor deposition and molecular beam epitaxy.

Key words: spectral interference; ellipsometry; film measurement; polarization separation

0 引言

薄膜厚度的高精度测量对于半导体工业、材料工程、航空航天等领域具有重要意义^[1-3]。基于

光学方法的纳米层测量技术由于具备非接触和高精度的优点, 逐渐成为薄膜检测的主流技术^[4-6]。其中, 干涉型椭偏法由于可以测量多种光学参数且兼具高灵敏度、高精度和非机械式移动等特点,

收稿日期: 2023-02-04; 修回日期: 2023-02-20

基金项目: 自然科学基金重大研究计划培育项目(92150104); 自然科学基金重点项目(51835007)

引用格式: 张金旭, 陈家扬, 吴冠豪. 基于光谱干涉椭偏法的薄膜厚度测量[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 122-127.

Citation: ZHANG J X, CHEN J Y, WU G H. Thickness measurement of thin films based on spectral interference ellipsometry[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43(1):122-127.



被广泛应用于各种工业检测和科学研究中。

外差型椭圆法^[7-9]多利用声光调制器、横向塞曼效应和多普勒效应等方式产生频率差,噪声干扰较低,可实现高测量精度,但是为了获得光谱椭圆参数,需要进行波长扫描,系统较为复杂。双光梳椭圆法^[10-11]基于具有微小重频差的纵模分辨的双光梳系统,可实现快速、全光谱的椭圆参数测量,但是该方法所使用的光源系统略复杂,且成本较高。光谱干涉椭圆法可一次性获得全光谱的椭圆参数,测量精度高,测量装置简单,已经有研究者将该方法应用于傅里叶模态法光栅结构参数解耦^[12]和非透明基底的薄膜厚度测量^[13]。

半导体领域中的薄膜材料多附着于硅基层,为了避免硅层的相干或非相干叠加信号的干扰,测量方法包括更换入射波段、改变样品结构和数字矫正等^[14-15],但是这些测量方法的实时性和可靠性存在局限。针对此问题,本文提出了基于光谱干涉椭圆法的偏振分离式马赫曾德测量系统,以近红外飞秒激光器为光源,独立探测偏振信息,实现硅基底上的二氧化硅薄膜的厚度测量,并通过实验对测量准确性和可靠性进行验证。

1 基本原理

椭圆法通过测量经过样品透射或反射的椭圆参数 (ψ, Δ) 并结合非线性最小二乘迭代过程,拟合得到薄膜的参数信息。椭圆参数主要包括水平偏振分量 p 和垂直偏振分量 s 的振幅比和相位差,以反射型为例,有

$$\tan(\psi)e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s} \quad (1)$$

式中: R_p 为水平偏振分量的复振幅反射系数; R_s 为垂直偏振分量的复振幅反射系数; i 为虚数单位。

不同偏振分量的复振幅反射系数可表示为

$$R = \frac{r_1 + r_2 \exp(-i2\beta)}{1 + r_1 r_2 \exp(-i2\beta)} \quad (2)$$

式中: r_1, r_2 为与每一层的复折射率 N 和入射角 θ_1 有关的不同介质界面的振幅反射系数,正交的偏振分量的表示方法不同,可通过菲涅尔公式推导出; β 为薄膜的位相厚度,可表示为

$$\beta = \frac{2\pi N h}{\lambda} \cos \theta_2 \quad (3)$$

式中: N 为薄膜层的复折射率; h 为薄膜层的几何

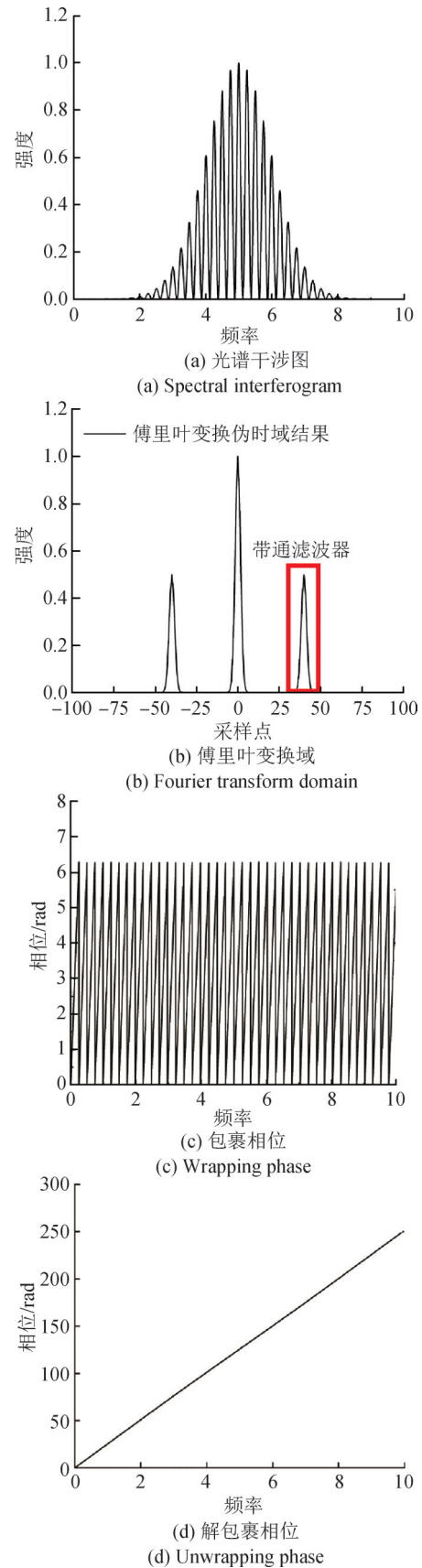


图1 光谱干涉解算原理

Fig.1 Principle of spectral interference solution

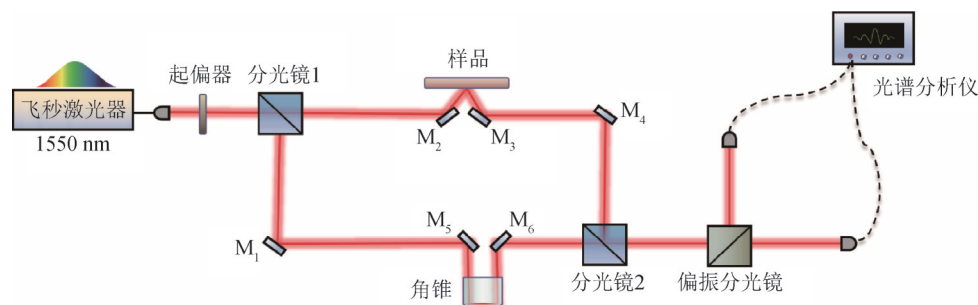


图2 偏振分离式实验装置图

Fig.2 Schematic of polarization separation experimental setup

厚度； θ_2 为薄膜中的折射角； λ 为光在真空中的波长。多层介质膜的椭圆偏参数可通过导纳矩阵和递推关系得到。

在其他条件固定时，椭圆偏参数是薄膜折射率、厚度和波长的函数，为了更准确地解耦薄膜的结构信息，一般需要获得宽光谱下的椭圆偏参数，由于相位差相较于强度比具有更高的准确性和灵敏度，因此，利用多波长下的相位差即可准确解耦得出薄膜的厚度。

光谱干涉椭圆偏法可获得水平偏振分量 I_p 和垂直偏振分量 I_s 的光谱干涉强度信息，其为频率的函数

$$I_{p,s}(f) = I_0(f) \cdot \cos\left(\frac{2\pi f}{c}L + \Delta_{p,s}(f)\right) \quad (4)$$

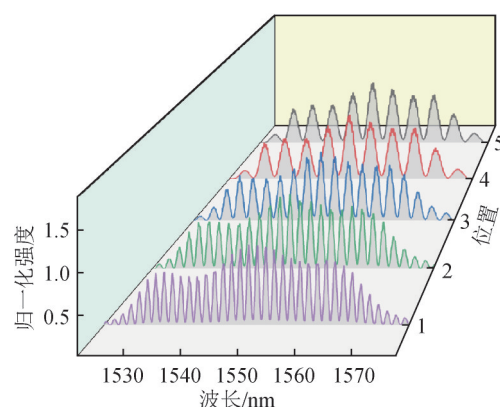
式中： I_0 为光源的光谱密度； c 为真空中的光速； L 为初始光程； $\Delta_{p,s}$ 为不同偏振态的相位。分别对正交的偏振分量进行快速傅里叶变换，可得到伪时域信息，通过带通滤波和逆傅里叶变换可选取待测光程对应的信息，之后通过取幅角和解包裹等过程，可得到不同频率处的相位，如图1所示。将正交的偏振分量的相位作差即可得到椭圆偏参数，利用非线性最小二乘迭代椭圆偏公式，即可拟合得到薄膜的待测信息。

2 实验系统

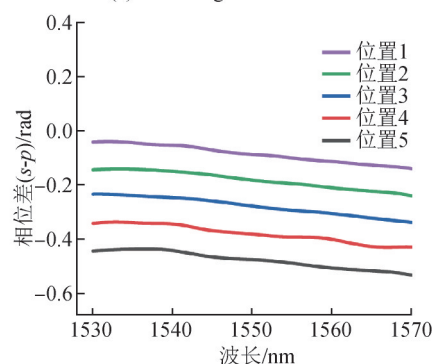
偏振分离式实验装置如图2所示，光源为本实验室自制的非线性偏振旋转型光纤飞秒激光器，其中心波长为1550 nm，输出功率约8 mW，半高宽约50 nm。种子光经准直器输出平行光进入空间系统中，经过起偏器产生偏振方向为45°的线偏光，该线偏光被分光镜1分成两束进入马赫曾德系统，一束光倾斜打到待测样品上，另一束光经过角锥产生等臂光束，二者在分光镜2处合光，最终

由偏振分光镜分成正交偏振的两束光，分别被Yokogawa研制的AQ6370C型光谱分析仪探测。

由于各光学元件表面镀有介质膜，测量时会引入系统误差，因此需要利用单面抛光的未镀膜纯硅片进行初相位标定，待测椭圆偏相位应减去该标定初相位。为了进一步判断相位的准确性及系统的可复现性，通过移动角锥改变系统的初始光程，光程变化范围为0.4~1.5 mm，判断移动过程中标定相位是否变化。图3(a)展示了系统的5个



(a) Interferograms



(b) Initial phase

图3 系统标定初相位

Fig.3 Initial phase of system calibration

不同光程的位置处对应的干涉信号, 图3 (b) 为系统的标定初相位, 以便于分析依次上移0.1 rad 的偏置。为了初步验证系统测量透明基底的可行性, 利用实验系统测量了双面抛光的纯硅片, 图4 为其对应的光谱干涉信号的傅里叶变换域, 两个峰值信息分别对应了前后表面的干涉信号, 通过傅里叶域滤波过程, 可以消除后表面的误差信号, 从而消除硅层的叠加信号。

为了标定入射角, 采用三个标称膜厚值分别为100, 280, 500 nm的沉积在单抛硅基底上的二氧化硅薄膜作为样品, 并利用商用椭偏仪 W-VASE

在1500~1600 nm 光谱范围和0.1 nm 光谱分辨力下提前对其膜厚值进行测量作为已知值, 以入射角作为迭代目标, 以实测椭偏相位和理论椭偏相位作为对象, 找出残差最小处的入射角度, 经迭代计算和平均后入射角为48.4°。图5 (a) 展示了三个样品的实验所测椭偏相位 (红线) 和在该角度下的理论椭偏相位 (蓝线), 为了进一步说明角度拟合效果, 以100 nm厚度的单抛硅基底上的二氧化硅薄膜样品为例, 展示了相位拟合残差, 如图5 (b) 所示。

3 实验结果

以透明双抛硅基底上镀二氧化硅薄膜作为实验样品, 以100 nm厚度的薄膜为例, 测试系统的薄膜厚度测量效果。图6 (a) 展示了实验所测椭偏相位和理论椭偏相位, 为了衡量系统的测量精度, 在样品中心区域选取相邻的5个位置进行薄膜厚度测量, 每个位置重复测量10次, 图6 (b) 展示了测量结果。

膜厚的测量精度可达到纳米级, 对应相位差

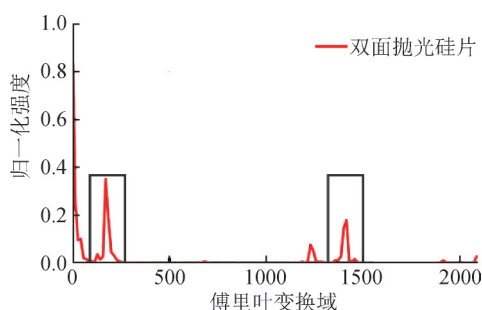
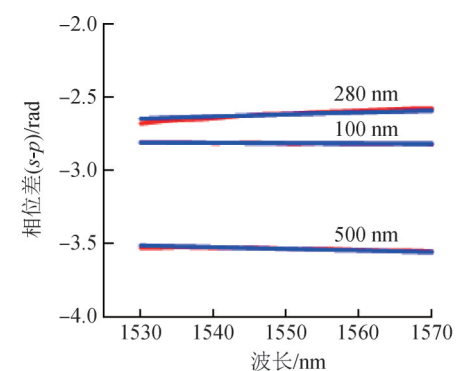


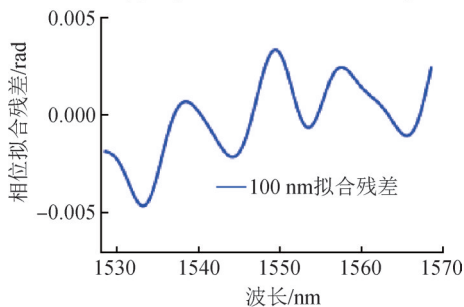
图4 傅里叶变换域

Fig.4 Fourier transform domain



(a) 实验和理论相位

(a) Experimental and theoretical phase

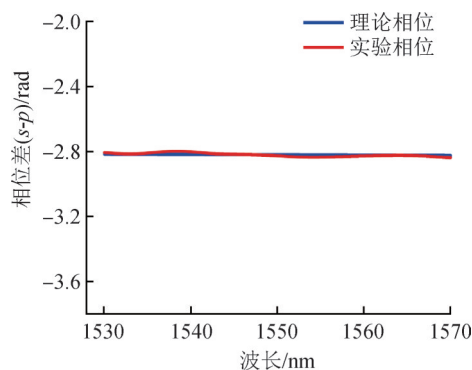


(b) 残差

(b) Residual error

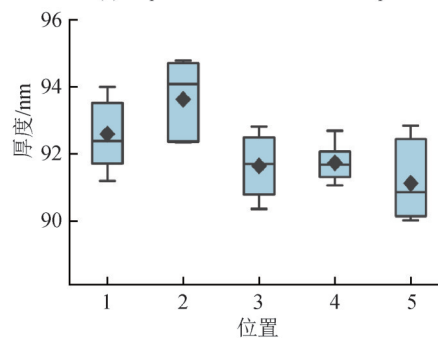
图5 角度拟合结果

Fig.5 Results of angle fitting



(a) 实验和理论相位

(a) Experimental and theoretical phase



(b) 测量结果

(b) Measurement results

图6 实验结果

Fig.6 Experimental results

的稳定性可达 10^{-3} ，这得益于光谱干涉法的高测量精度。为了衡量测量结果的准确性，利用商用椭偏仪在待测中心区域选择相同的5个位置（由于无法保证商用椭偏仪和实验测量位置完全相同，因此采用5次测量结果的平均值来评估测量结果的准确性），商用椭偏仪的厚度测量平均值为92.04 nm，实验的厚度测量平均值为92.3 nm，考虑样品的均匀性误差和仪器的测量误差，测量结果在误差允许范围内。表1展示了样品的5个位置处的测量结果。

表1 样品5个位置的测量结果
Tab.1 Measurement results of five positions
of the sample

位置	平均值/nm	标准差/nm
1	92.59	0.95
2	93.63	1.08
3	91.64	1.07
4	91.73	0.54
5	91.74	1.03

通过采用啁啾脉冲放大或自相似放大等方式提高光源输出功率^[16]，进一步优化偏振状态，并利用LabVIEW程序控制双通道光谱仪同时采集等方式，进一步提高测量精度，优化测量效果。

4 结论

提出了基于光谱干涉椭偏法的透明基底上薄膜厚度测量方法，建立了偏振分离式马赫曾德测量系统，并开展了针对双抛硅基底上所镀二氧化硅薄膜厚度的测量实验，以验证基于光谱干涉椭偏法的薄膜厚度测量方法的可行性与准确性，结果表明：该方法能够有效消除硅层的叠加信号，针对100 nm厚度的二氧化硅薄膜实现了纳米级的测量标准差。基于光谱干涉椭偏法的薄膜厚度测量方法具有准确性高、抗扰动性好的优点，可应用于高精度要求的光刻制造、显示设备研发、集成电路研制等领域中。飞秒激光相较白光具有高空间相干性，未来在本研究的基础上结合阵列型光谱仪有望实现毫秒量级线场或面场薄膜厚度测量^[17-18]。

参考文献

- [1] IRENE E A. Applications of spectroscopic ellipsometry to microelectronics[J]. Thin solid films, 1993, 233(1-2): 96 - 111.
- [2] FISCHER A C, FORSBERG F, LAPISA M, et al. Integrating mems and ics[J]. Microsystems and nanoengineering, 2015, 1(1): 1 - 16.
- [3] BIRNEY R. Current research in thin film deposition: applications, theory, processing and characterisation [J]. Coatings, 2020, 10(12): 1228.
- [4] GONDA S, TANAKA M, KUROSAWA T, et al. Sub-nanometer scale measurements of silicon oxide thickness by spectroscopic ellipsometry[J]. Japanese journal of applied physics, 1998, 37(11B): L1418.
- [5] FUJIWARA H. Spectroscopic ellipsometry: principles and applications[M]. John Wiley and Sons, 2007.
- [6] 步海军, 黎俊, 夏燕, 等. 基于Stokes矢量分析的偏光片光学参数测量[J]. 计测技术, 2021, 41 (6): 36 - 40.
BU H J, LI J, XIA Y, et al. Measurement of polarizer optical properties based on Stokes vector analysis [J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41 (6): 36-40. (in Chinese)
- [7] TOPCU S, CHASSAGNE L, ALAYLI Y. A new type of fiber-optic-based interferometric ellipsometer for in situ and real-time measurements[J]. Review of scientific instruments, 2003, 74(10): 4442 - 4447.
- [8] HEMMES K, HAMSTRA M A, KOOPS K R, et al. Evaluation of interferometric ellipsometer systems with a time resolution of one microsecond and faster[J]. Thin solid films, 1998, 313: 40 - 46.
- [9] WATKINS L R. Accurate heterodyne interferometric ellipsometer[J]. Optics and lasers in engineering, 2010, 48 (1): 114 - 118.
- [10] MINAMIKAWA T, HSIEH Y D, SHIBUYA K, et al. Dual-comb spectroscopic ellipsometry [J]. Nature communications, 2017, 8(1): 1 - 8.
- [11] 武腾飞, 韩继博, 白毓, 等. 双光梳绝对距离测量实验研究[J]. 计测技术, 2022, 42 (3): 50 - 55.
WU T F, HAN J B, BAI Y, et al. Research on absolute distance measurement experiment of double optical comb [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (3): 50 - 55. (in Chinese)
- [12] KIM D, KIM H, MAGNUSSON R, et al. Snapshot phase sensitive scatterometry based on double-channel spectral

- carrier frequency concept[J]. Optics express, 2011, 19(24): 23790 – 23799.
- [13] HLUBINA P, CIPRIAN D, LUNACEK J. Spectral interferometric technique to measure the ellipsometric phase of a thin-film structure[J]. Optics letters, 2009, 34(17): 2661 – 2663.
- [14] JOERGER R, FORCHT K, GOMBERT A, et al. Influence of incoherent superposition of light on ellipsometric coefficients[J]. Applied optics, 1997, 36(1): 319–327.
- [15] HAYTON D J, JENKINS T E. On the frustration of back-surface reflection from transparent substrates in ellipsometry[J]. Measurement science and technology, 2003, 15(2): N17.
- [16] FERMAN M E, HARTL I. Ultrafast fibre lasers[J]. Nature photonics, 2013, 7(11): 868 – 874.
- [17] YU Q, ZHANG Y, ZHANG Y, et al. A novel chromatic confocal one-shot 3D measurement system based on DMD[J]. Measurement, 2021, 186: 110140.
- [18] KATO T, UCHIDA M, TANAKA Y, et al. One-shot three-dimensional imaging using a two-dimensional spectrometer with a fiber bundle[J]. Optics express, 2021, 29

(26): 43778 – 43792.

(本文编辑:刘圣晨)



第一作者: 张金旭 (1999—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为光频梳光谱干涉厚度、折射率测量。



通讯作者: 吴冠豪 (1981—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光频梳精密计量和激光雷达等。