

空间分束法消除椭偏测量背反误差

周 明 陈 刚 刘定权

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要 在探索空间分束法消除椭偏测试中背反杂光干扰的过程中,发现该方案能够使光束在待测样品前表面聚焦,后表面发散,发散的背反光将无法进入到探测器中,从而消除背反光的影响。选用石英玻璃和氧化铌单层膜为实验样品,分为 3 组,分别采用直接测量、背部打磨和空间分束三种测量模式。实验结果表明,样品未经处理情况下,不同角度直接测量得到石英玻璃折射率值差别较大,经过背部打磨后不同角度下得到石英玻璃折射率趋向一致,而采用空间光学分束处理后,石英玻璃折射率在不同角度下测试获得相同的数据。最后采用空间分束法对氧化铌单层膜进行椭偏测量,获得了较好的拟合数据。

关键词 薄膜;背反;椭偏法;光学常数

中图分类号 O433.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0431001

Backside Reflection Error for Ellipsometric Measurement Eliminated by Spatial Splitting Beam Method

Zhou Ming Chen Gang Liu Dingquan

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract Spatial beam method is explored to eliminate the backside reflection in ellipsometric measurement. The main concept of this program is to focus the beam on the of sample surface, diverge on the bottom, and then the back reflection light will not reach the detector. The quartz glass and niobium oxide monolayer film are chosen as the experimental sample. Quartz glass samples are divided into 3 groups, which are measured directly, after backside grinding, and after the spatial splitting, respectively. For the untreated sample testing, the refractive index values at three incident angles are obviously different. In backside grinding case, the refractive index of the quartz glass appears consistent for three incident angles. After the spatial splitting, the refractive index of the quartz glass appears the same. The spatial splitting method is used for ellipsometric test of anti-niobium oxide monolayer, and good fitting of the experimental data is got.

Key words thin films; backside reflection; ellipsometry; optical constant

OCIS codes 310.6860; 310.3860; 310.5448

1 引 言

薄膜技术在信息存储、电子元器件、航天技术以及光学仪器等领域都有越来越广泛的应用,薄膜光学特性和表面形态的准确测量逐渐成为薄膜研究的重要方向之一^[1,2]。由于各种材料在薄膜与块状两种不同存在状态下的物理性能有很大差异,而薄膜的物理性能又与薄膜的光学性质和厚度有着密切关系,精确测定薄膜的光学性质和厚度已成为薄膜研

究工作者需要解决的重要问题^[3,4]。

一直以来,如何减小和消除“背反”是椭偏术研究者期待解决的问题。目前有以下几种方案可以减小背反影响。1)软件数据处理方法,部分椭偏数据处理软件带有背反数据消除功能,能够有效修正受背反影响情况下测量得到的数据。这种方案误差较大,且不能照顾到各种偏振的实际测试情况。2)采用基底背面打磨的方法,这种方法比较常用,但是要

收稿日期: 2012-10-26; 收到修改稿日期: 2012-11-28

基金项目: 中国科学院上海技术物理研究所创新专项(Q-DX-23)资助课题。

作者简介: 周 明(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事光学薄膜材料方面的研究。

E-mail: zhouming@mail.sitp.ac.cn

得到理想的打磨效果,工艺上相对比较麻烦,耗时耗力,并且容易对测量面产生影响,或者导致打磨后的基片不能进行其他光学测量。因此探索非机械式消除背反具有一定的意义。本文探索采用所谓空间光学分束法,即考虑在空间上直接把背反光和反射光分开,而对薄膜本身并无影响。

2 实验方法和原理

椭圆偏振测量术是一种测定入射光被样品反射(或透射)后偏振状态变化的光学方法^[5,6]。它通过测量被测对象反射后光线偏振状态变化情况来研究被测物质的性质。这是一种非破坏型精确测试方法,其测量原理如图1所示。对反射式椭偏仪而言,入射光s和p方向上的偏振化强度分别为 E_{is} 和 E_{ip} 与待测材料表面作用后,其偏振光的方向和光强均发生改变,反射光s和p方向上光强分别为 E_{rs} 和 E_{rp} 。假设两个复反射系数 R_s 和 R_p 分别代表s和p方向上反射和入射光束的电场矢量复振幅之比,即

$$R_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = r_s \exp(i\delta_s), \quad (1)$$

$$R_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = r_p \exp(i\delta_p). \quad (2)$$

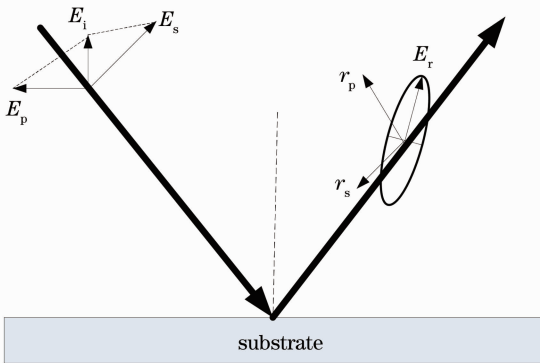


图1 椭圆偏振测量原理

Fig.1 Measurement principle of ellipsometry

反射法测量椭圆偏振光是通过测量入射波和反射波的偏振态改变而求出p偏振和s偏振菲涅耳反射系数比值 ρ :

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = \frac{r_p}{r_s} \exp[i(\delta_p - \delta_s)] = \tan \Psi \exp(i\Delta), \quad (3)$$

式中 Δ 和 Ψ 为常见的椭圆偏振参数。实际测量时,椭圆偏振仪光路并不如图1那样理想。对于透明材料而言,由于折射光的存在,在上述光学模型中存在“背面反射”现象。入射到基底上的光 E_i ,在空气与基底表面产生折射,折射光束穿过透明材料,在基片的底部

产生多次反射,最后从基底的上表面射出。如图2所示, E_{b1} 、 E_{b2} 为该透明基片背面反射光。

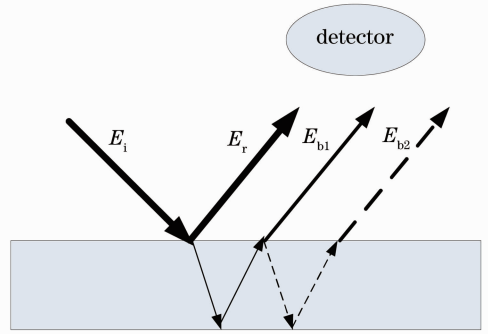


图2 椭圆偏振测量术测量产生“背反”示意图
Fig.2 Schematic diagram of backside reflection by ellipsometry measurements

在图2中,背反杂光 E_{b1} 、 E_{b2} 和 E_r 同时进入探测器,将会导致测量数据不准确。背反杂光的进入不可避免会影响椭圆偏振测量精度,哪怕仅有很少的杂光引入,都会对椭圆偏振测量结果带来影响^[7]。本文采用美国J. A. Woollam公司生产的WVASE-32型光谱型椭圆偏振仪作为研究工具。该椭圆偏振设备主要采用反射后光波偏振态变化为依据,得到两个重要的椭圆偏振参数 Ψ 和 Δ ,通过自带相关软件计算得到光学常数。该椭圆偏振仪测试波长范围可达300~2500 nm,测试角度范围为30°~80°。此处采用普通石英玻璃作为实验研究对象。石英玻璃双面抛光,面积为25 mm²,厚度为2 mm,是可见到近红外区域一种常见的基底材料。

对这组样品在没有经过任何处理情形下进行椭圆偏振测试,所选取的测试角度分别为60°、65°、70°,测试波长范围为300~1200 nm。第二组样品采用砂纸进行背面打磨,处理之后依然采用60°、65°、70°的测试角度,波长范围为300~1200 nm的测试条件进行椭圆偏振测试。最后一组样品采用前端聚焦透镜光束聚焦,焦点在待测样品前表面,后端探测器采用光束扩束的方法在上述同等条件下椭圆偏振测试。在测试过程中,两个透镜的引入会改变入射光和反射光的偏振态。首先分别测试这两个透镜引起的偏振,透镜引起的偏振相位变化是固定的,直接在测试得到的椭圆偏振数据中予以消除。图3给出了前端透镜聚焦,后端扩束的示意图。合理放置聚焦镜的位置,使得待测基底的前表面处于透镜焦点位置处,此处入射光束的光斑直径达最小,然后扩束镜位于探测器前段。由图3可知,聚焦光束在玻璃基底内部发散,再次经过扩束镜后,光束将进一步发散偏离,无法进入到探测器中。

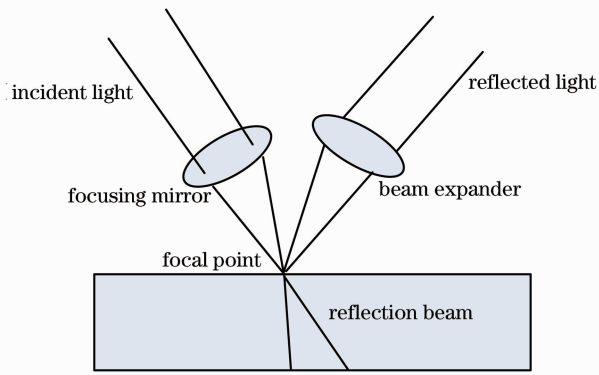


图 3 前端透镜聚焦,后端扩束示意图

Fig. 3 Schematic diagram of front lens focusing and the back beam expanding

3 石英玻璃样品椭偏测试

图 4(a)给出石英玻璃在未经任何处理下测试

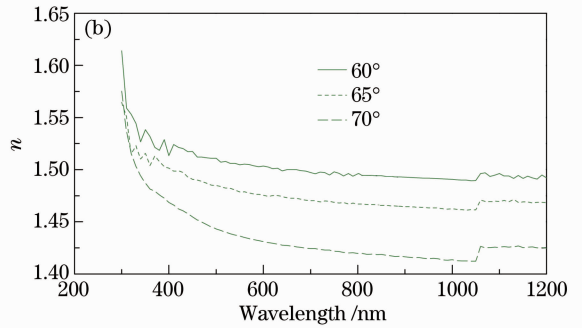
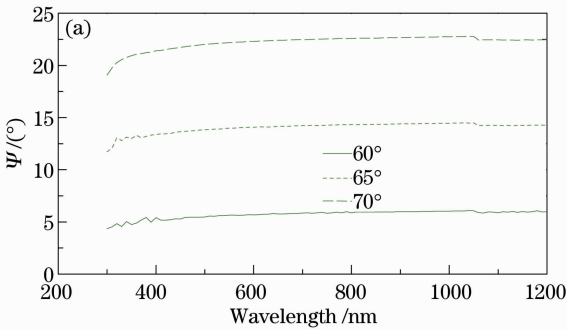


图 4 石英玻璃未经处理的测试数据。(a)椭偏参数随着波长变化；(b)折射率随着波长变化

Fig. 4 Test data of quartz glass without treatment. (a) Ψ versus wavelength; (b) n versus wavelength

图 5(a)给出了石英玻璃经过背部打磨处理后测试椭偏参数 Ψ 值随着测试波长的变化。采用金刚石磨刀对石英玻璃背面进行打磨,经过背面打磨后,折射率 n 值在不同入射角度入射下趋向一致性,不同角度下折射率 n 之间差异在 0.1~0.3 左右。但是由于打磨效果并非十分理想,依然会有少量杂

散光进入探测器中,导致不同角度下所测试得到折射率仍然存在偏离。

图 6 给出了石英玻璃前端聚焦,后端扩束空间光学处理后,测试得到椭偏参数 Ψ 值随测试波长的演化。按照图 3 给出的实验装置示意图,采用的聚焦镜在样品前表面聚焦光斑直径为 200 μm 。经过

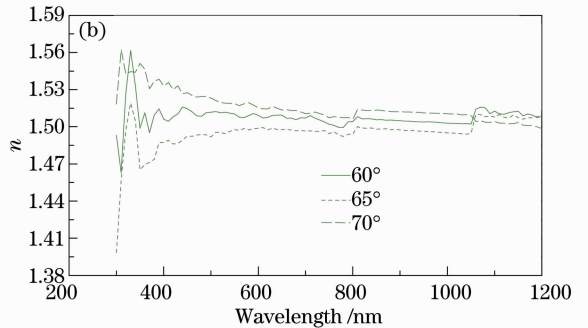
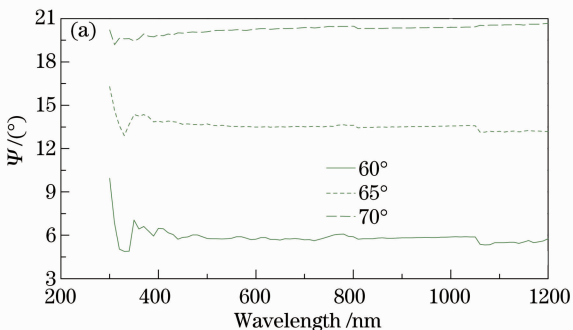


图 5 石英玻璃背部打磨后的测试数据。(a)椭偏参数随着波长变化；(b)折射率随着波长变化

Fig. 5 Test data of quartz glass after backside grid. (a) Ψ versus wavelength; (b) n versus wavelength

空间光学处理后,获得的不同角度入射下折射率数据具有很好的一致性,在可见近红外区域测试得到折射率 n 值基本上相同,所获得数值在 1.5~1.56

之间变化。这证明了对于石英玻璃而言,采用前端聚焦,后端扩束空间光学处理方法对于消除背反杂光影响有很好的效果。

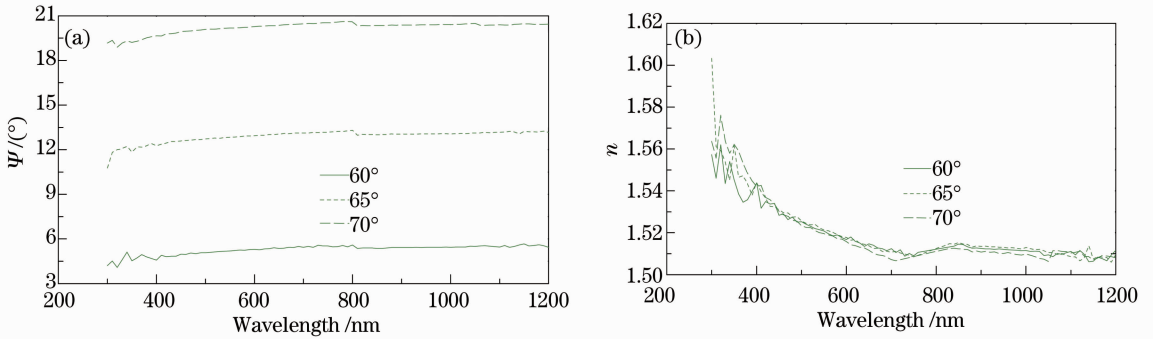


图 6 石英玻璃空间分束处理后的测试数据。(a) 椭圆参数随着波长变化; (b) 折射率随着波长变化
Fig. 6 Test data of quartz glass after spatial beam splitting treatment. (a) Ψ versus wavelength; (b) n versus wavelength

4 氧化铌单层薄膜椭圆测试

第 3 节采用石英玻璃基底作为研究对象,分别对比了直接测试、背部打磨、空间分束三种方案的椭圆测试结果。结果表明,采用前表面聚焦、后表面发散的空间光学方案可有效消除背反,可保证不同角度入射下获得的光学常数一致。氧化铌薄膜镀制在第 3 节所述石英基底上,利用电子束蒸发技术得到单层氧化铌薄膜,制备薄膜厚度为 160 nm 左右。图 7(a)给出了采用空间分束法消背反后,测试得到

椭圆 Ψ 值及其拟合结果。选用 60° 和 70° 两个测试角度,测试光谱范围为可见区域 400~1200 nm。建立模型为底层石英基底,上层 Cauchy 模型。图 7(a) 给出经空间光学处理后的实验数据和上述模型拟合结果,其最佳拟合均方差(MSE)为 3.22,在所述模型下获得了较好的拟合。图 7(b) 给出了经空间光学处理后测试得到的退偏振数据,可看出在 60° 和 70° 入射的情形下,退偏为 0.2% 左右,且不同角度下退偏数据非常接近。

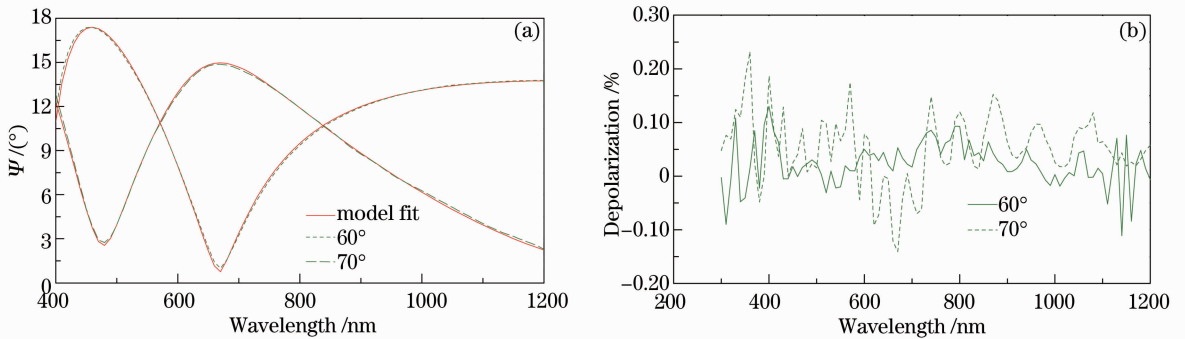


图 7 空间光学处理后得到氧化铌薄膜拟合和退偏数据。(a) 膜椭圆测试拟合结果; (b) 不同入射角度下膜退偏数据
Fig. 7 Fitting result and depolarization data of niobium oxide film after spatial optical treatment. (a) Ψ versus wavelength; (b) depolarization data with different incident angles

5 结 论

准确测量各类光学薄膜的光学常数,已经成为薄膜研究工作中十分重要的一个环节。在影响光学薄膜椭圆测量的各类因素中,背反杂光成为了十分突出的一个问题。从实验数据可以看出,目前所采用的空间光学方案能有效消除背反杂光对测试数据

干扰,但该方案也存在一定的局限性,比如要求待测基片厚度不能太小,此时如果把空间分束与机械打磨消背反结合起来,将会获得更好的测试结果。

参 考 文 献

1 D. Amans, S. Callard, A. Gagnaire *et al.*, Ellipsometric study of silicon nanocrystal optical constants [J]. *J. Appl. Phys.*,

- 2003, **93**(7): 4173~4179
- 2 P. L. Washington, H. C. Ong, J. Y. Dai *et al.*. Determination of the optical constants of zinc by spectroscopic ellipsometry [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(25): 3261~3263
- 3 Zhou Yi, Wang Aiying. Determination of optical constants and thickness of diamond-like carbon films by a multiple sample method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2468~2472
周 毅, 汪爱英. 多样品法确定类金刚石薄膜的光学常数与厚度 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2468~2472
- 4 Zhang Deheng, Xu Zhaofang, Li Boxun. Study on optical property of DLC/Ag/DLC multilayer films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 2031~2035
张德恒, 徐照方, 李伯勋. DLC/Ag/DLC 复合多层薄膜光学性能 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 2031~2035
- 5 D. P. Arndt, R. M. A. Azzam, J. M. Bennett *et al.*. Multiple determine of the optical constants of thin-film coating materials [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(20): 3571~3593
- 6 C. M. Herzinger, B. Johs, W. A. McGahan *et al.*. Ellipsometric determination of optical constants for silicon and thermally grown silicon dioxide via a multi-sample, multi-wavelength, multi-angle investigation [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **83**(6): 3323~3336
- 7 Wu Suyong, Long Xingwu, Yang Kaiyong. Technique to minimize the characterization eviations of optical parameters of thin films caused by ellipsometric measurement systematic errors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0631001
吴素勇, 龙兴武, 杨开勇. 一种最小化薄膜光学参数表征偏差的椭偏测量系统误差处理技术 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0631001

栏目编辑：韩 峰