

旋转入射面法的进一步研究与推广

刘永利^{1,2} 张锦龙^{1,2*} 王占山^{1,2}

(¹ 同济大学精密光学工程技术研究所物理系, 上海 200092)
(² 先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要 光学薄膜的反射率和透射率是其主要光学特性。透射率易于测量且精度较高,常用于光学薄膜光学常数和膜厚的拟合。许多光学薄膜工作在倾斜入射条件下,常需要测量其倾斜入射透射率(T_s 和 T_p)。在测量过程中,需要使用起偏器产生高偏振度的线偏振光。对于小型分光光度计来说,为其提供一个满足要求的起偏器,无疑将增加相当的成本。为解决这一问题,对旋转入射面法进行了进一步的研究和推广。考虑到旋转入射面法可使用具有一定偏振度的部分偏振光进行倾斜入射透射率的测量,且分光光度计的输出光束通常为具有一定偏振度的部分偏振光,旋转入射面法在满足一定条件的前提下可以不使用起偏器测量光学薄膜的倾斜入射透射率。研究表明:当偏振因子绝对值大于 0.167 时,旋转起偏器可以精确测量光学薄膜的倾斜入射透射率,且偏振因子绝对值越大测量精度越高。该方法所测平均透射率在整个测量波段内都具有很高的精度;而 T_s 和 T_p 在透射率对入射角较不敏感或随波长变化较平坦的波段具有较高的测量精度。

关键词 测量;透射率;分光光度计;起偏器;光学薄膜;入射角;倾斜入射

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0712008

Advanced Study and Generalization of Rotation-Incidence-Plane Method

Liu Yongli^{1,2} Zhang Jinlong^{1,2} Wang Zhanshan^{1,2}

¹ Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering,
Tongji University, Shanghai 200092, China

² Key Laboratory of Advanced Micro-Structure Materials, Ministry of Education, Shanghai 200092, China

Abstract Reflectance and transmittance are main optical property of optical thin films. Transmittance is easier to be measured and has a higher accuracy than reflectance. Therefore, it's frequently used to fit the optical constant and thickness of the film. Many coatings work in the oblique incidence case in application, and its oblique transmittances T_s and T_p are needed. A perfect polarizer with high extinction ratio is needed in this case. However, it costs too much for the compact spectrophotometer to provide such a polarizer. In order to solve this problem, rotation-incidence-plane (RIP) method is investigated deeply and generalized. Because RIP method makes measurement with a partially polarized beam, and the output beam of the spectrophotometer is partially polarized, RIP method can measure the oblique transmittance under certain condition. Advanced investigation found that if the absolute value of the polarization factor of the measurement beam is bigger than 0.167 the RIP method can make an accurate measurement about the oblique transmittance of optical coatings, and the polarization factor bigger the accuracy higher. This method has a good accuracy in the wavelength region, in which the transmittance is nearly flat or not sensitive very much to the incidence angle, when it's used to measure the T_s and T_p . What's more, the method has a better accuracy when it's used to measure the average transmittance.

Key words measurement; transmittance; spectrophotometer; polarizer; optical thin film; incidence angle; oblique incidence

OCIS codes 120.6200; 310.5448; 310.6188

收稿日期: 2013-11-04; 收到修改稿日期: 2014-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(61108014, 61108036)、中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 刘永利(1984—),男,博士研究生,主要从事高激光损伤阈值薄膜方面的研究。E-mail: xlx9984@gmail.com

导师简介: 王占山(1963—),男,博士,教授,主要从事光学薄膜、极紫外与 X 射线光学系统等方面的研究。

E-mail: wangzs@tongji.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jinlong@tongji.edu.cn

1 引 言

光学薄膜的光谱特性是光学薄膜的主要光学特性之一^[1-3],也是获得光学薄膜结构和光学常数的主要原始数据^[4-10]。部分光学薄膜工作在倾斜入射条件下,其倾斜入射透射率是必需的测量项目。对膜厚和光学常数拟合而言,多角度倾斜入射透射率能提供更多信息,可大大减小拟合中的不确定性和误差^[11-15]。因此,精确测量光学薄膜的倾斜入射透射率对光学薄膜精确制备和表征具有重要意义。

当入射角较大时,光学薄膜表现出强烈的偏振特性^[1],对于多层膜这一现象更加突出。精确地测量这一类光学薄膜的倾斜入射光谱特性,需要借助于高性能的宽光谱起偏器^[11]。在各种光谱测量中,通常假设起偏器为理想起偏器,而实际起偏器并非如此,因此偏振问题在一定程度上影响着光谱测量的精度^[16-17]。实验中发现,当入射角较大时起偏器性能通常会成为影响透射率测量精度的主要因素。

测量薄膜倾斜入射透射率的旋转入射面法^[14]从理论上消除了偏振因素(如入射光的偏振度,起偏器的消光比和样品的偏振效应)对透射率测量精度的影响,大大降低了大角度倾斜入射透射率测量精度对起偏器性能的依赖。

理论上,任意的部分偏振光都可以用于旋转入射面法的测量,但由于测量光束的偏振因子对其余测量误差起放大作用,只有当偏振因子大于某一阈值时,总测量误差才在可接受的范围内。文献^[14]并没有对测量光束偏振因子的范围进行分析。本文对这一内容的深入研究表明,当入射光束偏振因子绝对值大于 0.167 时,旋转入射面法便可以获得较为满意的测量精度。在此基础上对旋转入射面法进行了推广,即不使用专用起偏器来测量光学薄膜的倾斜入射透射率。对于光谱仪输出光束的偏振因子绝对值大于 0.167 的波段,可不使用起偏器,直接用旋转入射面法进行测量;而对于入射光束接近自然光或圆偏振光的波段,须使用起偏器使测量光束的偏振因子绝对值大于 0.167 后,再进行测量^[14]。

2 旋转入射面法原理

测量宽光谱倾斜入射透射率的旋转入射面法^[14],采用部分偏振光进行测量(如图 1 所示)。 S_i 和 S_o 为入射光和透射光的斯托克斯矢量, M 为被测镀膜基板的米勒矩阵,其中 $S_i = (S_{i,0}, S_{i,1}, S_{i,2}, S_{i,3})$, $S_o = (S_{o,0}, S_{o,1}, S_{o,2}, S_{o,3})$ 。

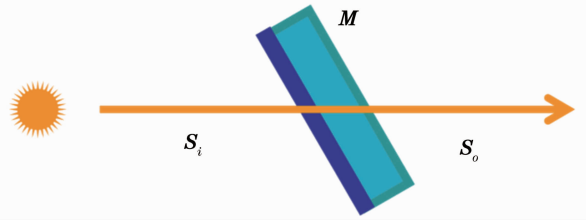


图 1 利用部分偏振光测量光学薄膜倾斜入射透射率的示意图

Fig. 1 Diagram of measurement of oblique transmittance of optical thin film with partially polarized light

与常规方法通过旋转起偏器来改变入射光的偏振状态不同,旋转入射面法通过旋转被测样品的入射面来改变入射光的偏振状态,具体方法如图 2 所示。部分偏振光 S_i 照射样品时,设样品入射面位于水平面和竖直面内时,样品的透射率分别为 T_h^m 和 T_v^m ,而样品的真实透射率分别为 T_s 和 T_p 。 T_h^m 和 T_v^m 中 h 和 v 分别表示样品的入射面位于水平面和竖直面内。则真实透射率 T_s 和 T_p 可表示为

$$\begin{cases} T_s = \frac{1}{2} \left[(T_h^m + T_v^m) + \frac{1}{p} (T_h^m - T_v^m) \right] \\ T_p = \frac{1}{2} \left[(T_h^m + T_v^m) - \frac{1}{p} (T_h^m - T_v^m) \right] \end{cases}, \quad (1)$$

式中 p 为入射光的偏振因子,定义为

$$p = \frac{S_{i,1}}{S_{i,0}} = \frac{I_x - I_y}{I_x + I_y}, \quad (2)$$

式中 I_x 和 I_y 分别为入射光 S_i 中电矢量沿水平和垂直方向振动的分量的光强。测量中,可利用薄平板玻璃来标定测量光束的偏振因子 p ^[14]。

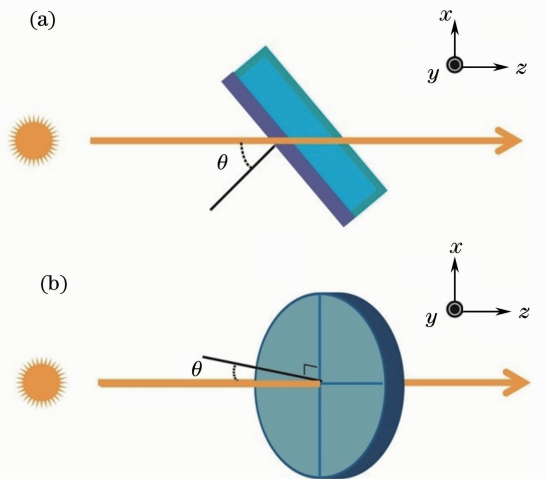


图 2 测量(a) T_h^m 和(b) T_v^m 的示意图 (θ 为入射角)

Fig. 2 Schema of measurement of the (a) horizontal and (b) vertical transmittances (θ is the angle of incidence)

p 的取值在 -1 和 1 之间。当 $p = 0$ 时, 光束为自然光或圆偏振光; 当 $p = \pm 1$ 时均为线偏振光。不同的是: 当 $p = 1$ 时电矢量沿水平方向振动, 而 $p = -1$ 时电矢量沿竖直方向振动; 当 $-1 < p < 1$ 且 $p \neq 0$ 时, 光束为部分偏振光或椭圆偏振光。

3 偏振因子的取值范围

倾斜入射时, 传统测量方法的透射率测量误差的主要来源有入射角误差、光束发散角、光源不稳定、偏振效应以及基板折射引起的光束漂移等因素^[17]。用旋转入射面法测量光学薄膜的透射率时, 除偏振效应外, 导致 T_h^m 和 T_v^m 产生误差的因素与导致传统测量方法测量结果产生误差的因素相同, 且均可利用传统方法中的相应手段减小其对最终误差的贡献。

旋转入射面法的最终测量结果 T_s 、 T_p 与 p 、 T_h^m 、 T_v^m 之间存在(1)式所示关系, 因此后者的误差会传递给前者。对(1)式中的两式两边求导, 整理后可得旋转入射面法的误差传递公式

$$dT_s = \frac{1}{2}(dT_h^m + dT_v^m) + \frac{1}{2} \frac{dT_h^m - dT_v^m}{p} - \frac{1}{2} \frac{T_h^m - T_v^m}{p^2} dp, \quad (3)$$

$$dT_p = \frac{1}{2}(dT_h^m + dT_v^m) - \frac{1}{2} \frac{dT_h^m - dT_v^m}{p} + \frac{1}{2} \frac{T_h^m - T_v^m}{p^2} dp. \quad (4)$$

式中第一项等于平均透射率的误差, 第二项为由传统误差因素导致、但受偏振因子影响的误差, 第三项为偏振因子 p 的误差对最终误差的影响。前两项的主要误差源为光源不稳定、光束偏移、光束发散角和入射角误差等。其中, 光源不稳定、噪声和光束偏移等因素通过影响入射光束的光强及其分布影响测量误差, 而光束发散角和入射角误差则直接影响待测样品的透射率来影响测量误差。对其分开进行讨论。

3.1 入射角误差和光束发散角导致的测量误差

该误差由光学薄膜对入射角的敏感程度决定。由于不同膜系薄膜的入射角敏感程度各异, 且随波长变化较大, 难以进行定量的分析。仅对其进行了定性分析。

当透射率对入射角敏感度较低时(如裸基板、减反膜和单层膜), 该误差较小; 当透射率对入射角敏感程度较高时, 则该误差将非常显著。通常, 在透射

率比较平坦的波段或对入射角不敏感的波段, 旋转入射面法测量误差受入射角误差和光束发散角的影响较小; 而在透射率急剧变化的波段, 测量误差会较大。考虑到多数光学薄膜在工作波段内透射率比较平坦, 且该波段内的入射角容差也较大, 因此其测量误差较小。

如需进一步减小入射角误差和光束发散角对测量误差的影响, 可采取如下方法。对于入射角误差所导致的测量误差, 可采用测量正负入射角透射率、并取平均值的方法^[18](称“正负入射角法”)。而对于光束发散角所导致的测量误差, 则需要通过使用光阑减小光束发散角的方法。

3.2 第一项误差和平均透射率误差

平均透射率的误差为

$$dT_a = \frac{1}{2}(dT_s + dT_p). \quad (5)$$

由(1)式可知

$$T_s + T_p = T_h^m + T_v^m. \quad (6)$$

对(6)式求微分得

$$\frac{1}{2}(dT_s + dT_p) = dT_a = \frac{1}{2}(dT_h^m + dT_v^m). \quad (7)$$

由(7)式可知, 旋转入射面的第一项误差等于其平均透射率的测量误差。(7)式还显示旋转入射面法的一个重要优点: 旋转入射面法所测平均透射率的误差不受偏振问题的影响。这意味着, 无论测量光束的偏振特性如何, 均可以精确地测量其倾斜入射透射率。据此, 可以精确地测量多角度透射率, 这对利用透射率精确地拟合光学薄膜的膜厚和光学常数非常有帮助。

3.3 第二项误差: 受偏振因子影响的误差

(3)、(4)式中, 除偏振因素外, 导致第二项误差的因素与第一项相同。由于偏振因子绝对值小于 1, 因此将放大直接测量误差 T_h^m 和 T_v^m 。测量中需要根据这些误差的大小和最大允许误差来设定所需要的人射光偏振因子。

光源不稳定、噪声和光束偏移等因素引起的测量误差一般比较小, 且容易控制。不妨令该项的最大容差为 $e_{s/p, \max}^{12, \text{pol}}$, 则有

$$\left| \frac{1}{2p}(dT_h^m - dT_v^m) \right| \leq e_{s/p, \max}^{12, \text{pol}}. \quad (8)$$

因此, 可按下式设定测量光束的偏振因子:

$$|p| \geq \frac{dT_h^m - dT_v^m}{2e_{s/p, \max}^{12, \text{pol}}}. \quad (9)$$

《紫外、可见和近红外分光光度计检定规程 GB/JJG 178-2007》要求透射率测量误差小于

2.0%。考虑到其他误差的存在,令 $e_{s/p, \max}^{12, \text{pol}} \leq 0.3\%$ 。根据测量经验,通过对 Cary5000 分光光度计进行校准,光源不稳定、噪声和光束偏移等因素引起的误差 ($dT_h^m - dT_v^m$) 通常可减小到 0.1% 以下,因此偏振因子绝对值必须大于 0.167。

3.4 第三项:偏振因子的误差引起的测量误差

偏振因子的测量误差主要来自空白基板的透射率测量误差。在光谱测量中,光栅在不停的转动,会导致测量光束偏振因子存在一定的误差。但此误差通常很小,可忽略。如果分光光度计移动过位置、维修或闲置时间较长,光束偏振因子将会产生较大的改变。在测量样品透射率之前必须重新标定偏振因子,否则导致较大误差。这一偏振因子可以由分光光度计厂商经过精确标定后,提供给使用者;也可以由使用者自己^[14]所介绍的方法进行标定。在自行标定偏振因子时,使用正负入射角法可有效降低入射角误差,并提高偏振因子的精度。

由于偏振因子 p 由测量而得,因此存在一定误差。以 e_3 表示该项误差,由(3)、(4)式可知

$$e_3 = \frac{1}{2} \frac{T_h^m - T_v^m}{p^2} dp. \quad (10)$$

由(1)式可知

$$T_h^m - T_v^m = p(T_s - T_p). \quad (11)$$

将(11)式代入(10)式得

$$e_3 = \frac{1}{2} (T_s - T_p) \frac{dp}{p}. \quad (12)$$

由(12)式可知, e_3 由待测样品的实际偏振效应 ($T_s - T_p$) 和偏振因子的相对误差 dp/p 共同决定。考虑到 $T_s - T_p \leq 100\%$, 于是有 e_3 的最大误差为 $0.5dp/p$ 。对于各种光学薄膜在不同波段和入射角条件下,若 e_3 的最大容许值为 0.5%, 就要求偏振因子的相对误差小于 1%。

综上所述,对于光学薄膜倾斜入射透射率的精确测量,除要求偏振因子的绝对值大于等于 0.167 外,还要求测量光束的偏振因子的精度优于 1%。

4 推 广

分光光度计内部的光栅具有强烈的偏振效应,并导致其输出光束通常为具有一定偏振度部分偏振光。根据上文的结论,在偏振因子绝对值大于 0.167 的波段,不使用起偏器便可测量光学薄膜的倾斜入射透射率。因此,本文对旋转入射面法进行了推广,考虑了不使用起偏器进行倾斜入射透射率的测量。测量步骤文献^[14]基本相同。

4.1 分光光度计输出光束的偏振因子

Cary5000 紫外-可见-近红外分光光度计输出光束的偏振特性如图 3 所示。该分光光度计使用两个光栅,分别用于短波和长波波段。800 nm 为两个光栅的转换波长。由于两个光栅的偏振特性不同,因此导致了 800 nm 处 p 光和 s 光光强的突变。图 3(a)为起偏器在输出 s 或 p 光时的透射率,以此代表 Cary5000 光束中 s 和 p 光的相对光强。图 3(b)为测量光束的偏振因子 p ,可由图 3(a)中 s 和 p 光的相对光强计算,计算方法如(2)式所示,公式中的 I_x 和 I_y 分别用 p 和 s 光的相对光强代替。应用中,在没有起偏器的条件下用旋转入射面法确定^[14]。

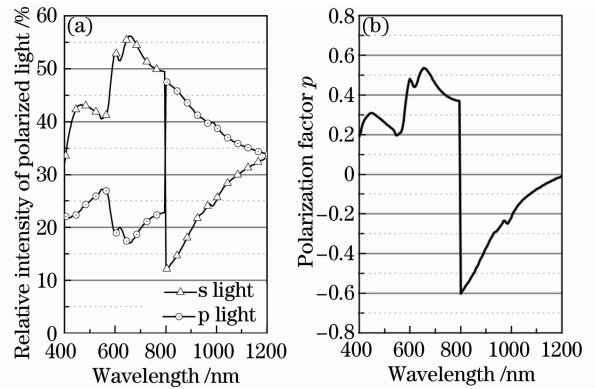


图 3 (a) Cary5000 光束的 s 和 p 分量的相对光强;
(b) 该光束的偏振因子

Fig. 3 (a) Relative intensity of the s and p light of the output beam of the Cary5000 spectrophotometer;
(b) polarization factor of the beam

在 400~1020 nm 范围内,测量光束的偏振因子 p 满足绝对值大于 0.167 的要求。因此,在这一波段可不使用起偏器,直接用旋转入射面法测量薄膜的透射率。当波长大于 1020 nm 时,偏振因子绝对值小于 0.167,至 1200 nm 附近降至 0,无法满足上文中对偏振因子绝对值必须大于 0.167 的要求,因此无法直接用于旋转入射面法的测量。在偏振因子小于 0.167 的波段,须使用起偏器提高测量光束的偏振因子后,再进行测量。

4.2 不使用起偏器测量光学薄膜的倾斜入射透射率

4.2.1 偏振因子绝对值大于 0.167 的波段

为检验在不使用起偏器的条件下旋转入射面法的可行性,本文对 Ti_2O_5 单层膜和 45° 532 nm 的 HfO_2/SiO_2 增透膜进行了测量,并将测量结果与使用高消光比起偏器的传统方法的测量结果进行了对比(如图 4 所示)。Cary5000 分光光度计出射光束

的偏振因子如图 3(b) 所示, 其测量方法见文献 [14]。测量中, 考虑到实验室尚无条件在被测样品前加入倾斜基板作为部分起偏器, 仅测量了偏振因

子绝对值大于 0.167 的 400~1000 nm 波段。入射角为 45°, 波长范围为 400~1000 nm, 狭缝宽度为 2 nm, 积分时间为 0.1 s。

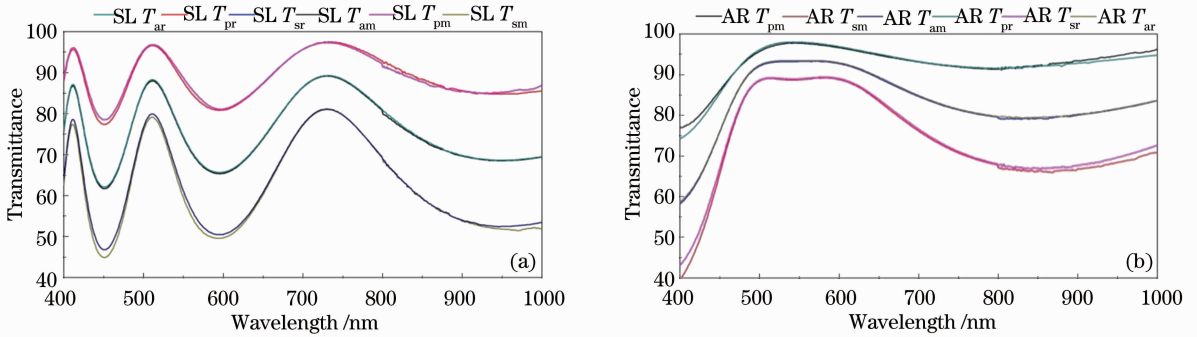


图 4 旋转入射面法和传统方法的透射率测量结果的对比。(a) Ta_2O_5 单层膜(SL)的透射率; (b) 532 nm $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 增透膜(AR)的透射率

Fig. 4 Comparison of the measured transmittance between the rotating-incidence-plane method and the traditional method.

(a) Transmittance of the Ta_2O_5 single layer coating; (b) transmittance of 532 nm $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ anti-reflection coating

由于使用高消光比起偏器的传统方法的测量精度较高, 因此以其测量结果为标准值, 对旋转入射面法的测量误差进行分析。图 4(a) 与 (b) 中, s 光透射率 T_s 和 p 光透射率 T_p 的最大误差均小于 2.0%。图 4(a) 中, 650~750 nm 波段, 单层膜的透射率曲线较稳平坦, T_s 、 T_p 和平均透射率 T_a 的误差均小于 0.5%。图 4(b) 中, 500~650 nm 波段, 为增透膜的工作波段, 透射率曲线非常稳平坦, T_s 、 T_p 和 T_a 的误差也均小于 0.5%。在整个测量范围内, 单层膜和增透膜 T_a 的测量误差都比 T_s 和 T_p 小, 其中 400~800 nm 波段 T_a 误差小于 0.5%, 800~1000 nm 波段 T_a 误差小于 1.0%。图 4 中, 虽然 800~1000 nm 波段的透射率曲线比 400~800 nm 波段平坦, 但前者 T_s 和 T_p 有与后者相当的误差, 且 T_a 的误差比后者大。这与前文“透射率曲线平坦的波段的测量误差较小”的结论矛盾。对于偏振光透射率 T_s 与 T_p 而言, 造成这种现象的主要原因为: 前者的偏振因子比后者小, 使得其对入射角误差和发散角导致的偏振光透射率测量误差的放大作用较强; 对平均透射率而言, 这主要是由这两个波段使用的两种探测器对光信号的响应不同造成的。在波长大于 800 nm 的波段, Cary5000 使用硫化铅探测器, 信噪比较差; 而在波长小于 800 nm 的波段, Cary5000 使用光电倍增管, 信噪比较好。图中曲线的命名规则如下: SL/AR T_{xy} , 其中 x 为 a, s 或 p, 分别代表平均透射率, s 或 p 光透射率; y 为 m 或 r, 分别代表旋转入射面法和传统方法的透射率。

4.2.2 偏振因子绝对值小于 0.167 的波段

由误差 (3) 式和 (4) 式可知, 当偏振因子绝对值小于 0.167 时, 倾斜入射透射率测量误差将会超出误差容限, 且随偏振因子绝对值的减小迅速增大; 当偏振因子为零时, 透射率测量误差为无穷大。为验证这一结论, 测量了中心波长为 1064 nm 高反膜的 45° 透射率, 并将其测量结果与使用起偏器的测量结果进行了对比。测量结果如图 5 所示。测量过程中, 入射角为 45°, 波长范围为 800~1300 nm, 狭缝宽度为 2 nm, 积分时间为 0.1 s。图中“non pol”和“with pol”分别代表使用和不使用起偏器的两种情况, T_s 、 T_p 和 T_a 分别为 s、p 光透射率和平均透射率。

图 5(a) 可以看出, 使用起偏器时, 测量光束的偏振因子接近于 1, 因此相应的透射率测量结果接近于真实值, 可将其所测透射率作为真实值, 分析不使用起偏器时透射率的测量误差。图 5(a) 中分光光度计的偏振因子为零的波长与图 3(b) 中不同。造成这一问题的原因是: 在两次测量之间, Cary5000 中与相关的机构光栅出现了故障, 维修之后其输出光束的偏振特性发生改变。图 5(b) 中, 在 1060 nm 处, 不使用起偏器的 s 和 p 光透射率出现了一个非常尖锐的峰, 而其他透射率曲线没有。这是因为不使用起偏器时, 该处的偏振因子为 0 [如图 5(a) 所示], 因此该处的测量误差为无穷大。又由于测量误差与偏振因子成反比, 因此透射率测量值随着偏振因子绝对值的增加而急剧减小, 从而形成了该处的尖峰。图 5(b) 中高反带的右侧波长小于 1250 nm

的波段内,不使用起偏器的透射率测量误差远大于高反带左侧。这是由于这一波段的偏振因子绝对值小于 0.167,而高反带左侧大于 0.167。图 5(b)中高反带的边缘处出现了透射率小于 0,且有很大波动的现象。这是由于此处透射率对入射角非常敏感,入射角误差和光束发散角导致透射率测量误差较大,在数据处理的过程中出现透射率为负的情况;

而且,此处测量光束的偏振因子绝对值又很小,进一步放大了透射率测量误差。由于高反带左侧的偏振因子绝对值大于右侧,图中还出现了高反带短波限处的波段小于长波限处的现象。图 5(b)中使用与不使用起偏器所测得平均透射率基本相同,这印证前文关于“旋转入射面法可以精确测量平均透射率,且不受偏振问题的影响”的结论。

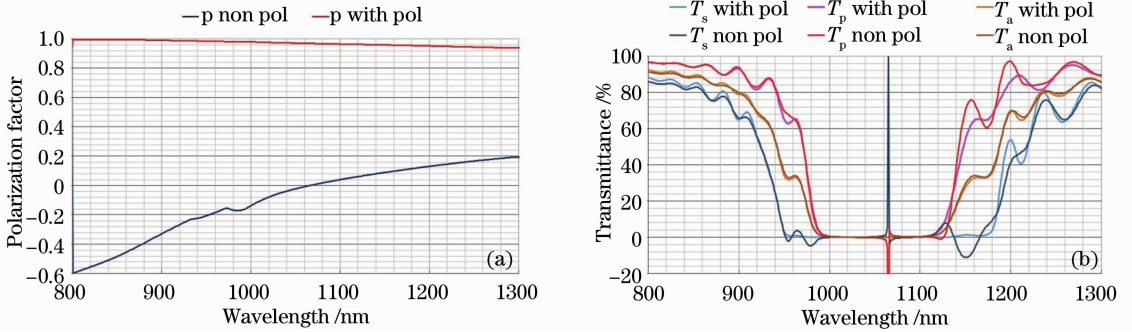


图 5 使用与不使用起偏器时,测量光束的偏振因子和 1064 nm 高反膜透射率的测量结果。(a)两种条件下的偏振因子;
(b) 1064 nm 高反膜在两种条件下所测透射率
Fig. 5 Polarization factor of the measurement beam and measured transmittance of 1064 nm high-reflector measured with or without a polarizer. (a) Polazition factor of the measurement beam under the two conditions; (b) measured transmittance of 1064 nm high-reflector under the two conditions

5 结 论

对旋转入射面法在不使用起偏器情况下测量光学薄膜倾斜入射透射率的方法进行了理论研究,以期其对提高光学薄膜倾斜入射透射率的测量精度和降低测量难度方面提供理论指导。通过对光束偏振因子的深入分析,发现:倾斜入射的平均透射率在整个测量波段内都有很高测量精度,且与偏振因子无关;对于 T_s 和 T_p ,当偏振因子绝对值大于 0.167 且相对误差小于 1%时,在透射率比较平坦或有一定入射角容差的波段,可以得到较好的测量精度。又考虑到分光光度计的输出光束为部分偏振光,将旋转入射面法进行了推广,即不用专用起偏器测量光学薄膜的倾斜入射透射率。对于测量光束偏振因子绝对值大于 0.167 的波段,可直接用该光束进行测量;对于偏振因子绝对值小于 0.167 的波段,必须采用起偏器提高测量光束的偏振因子后,再进行测量。不过,后一种情况对起偏器的性能要求不高。

由于该方法可以在不使用起偏器的条件下测量光学薄膜的倾斜透射率,它可使小型分光光度计在基本不增加成本的情况下,具备测量光学薄膜倾斜入射透射率的功能。目前该方法仅在透射率比较平坦或有一定入射角容差的波段可以实现较为精确的

测量。以后的工作中,将对提高其测量范围和精度的方法进行进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 H A Macleod. Thin-Film Optical Filters [M]. London: CRC Press, 2001.
- 2 Qin Yuan, Li Yi, Fang Baoying, *et al.*. Fabrication and optical properties of vanadium dioxide thin films doped by tungsten-vanadium co-sputtering [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1231002.
覃 源, 李 毅, 方宝英, 等. 钨钒共溅掺杂二氧化钒薄膜的制备及其光学特性[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1231002.
- 3 Dong Maojin, Wang Duoshu, Xiong Yuqing, *et al.*. Optics characterization of multi-spectrum HfON thin film [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s2): s231002.
董茂进, 王多书, 熊玉卿, 等. 多光谱氮化铪薄膜光学特性研究[J]. 光学学报, 2013, 33(s2): s231002.
- 4 D Arndt, R M Azzam, J M Bennett, *et al.*. Multiple determination of the optical constants of thin-film coating materials [J]. Appl Opt, 1984, 23(20): 3571-3596.
- 5 J Dobrowolski, F Ho, A Waldorf. Determination of optical constants of thin film coating materials based on inverse synthesis [J]. Appl Opt, 1983, 22(20): 3191-3200.
- 6 Wang Hongchang, Wang Zhanshan, Qin Shuji, *et al.*. Analysis of the reflectivity of Mo/Si multilayer film for soft X-ray [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(11): 1362-1365.
王洪昌, 王占山, 秦树基, 等. 软 X 射线 Mo/Si 多层膜反射率拟合分析[J]. 光学学报, 2003, 23(11): 1362-1365.
- 7 Shen Weidong, Liu Xu, Ye Hui, *et al.*. A new method for determination of the optical constants and thickness of thin film [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(7): 885-889.
沈伟东, 刘 旭, 叶 辉, 等. 确定薄膜厚度和光学常数的一种

- 新方法[J]. 光学学报, 2004, 24(7): 885-889.
- 8 Liu Chuanbiao, Wei Aixiang, Liu Yi. Optical constant and dielectric properties of erbium oxide thin films [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1724-1728.
刘传标, 魏爱香, 刘毅. Er_2O_3 薄膜的光学常数和介电性能[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1724-1728.
- 9 Fan Ping, Shao Jianda, Yi Kui, *et al.*. Optical constants of ion beam sputtering deposited copper films of different thickness [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 943-947.
范平, 邵建达, 易葵, 等. 离子束溅射沉积不同厚度铜膜的光学常数研究[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 943-947.
- 10 Liu Huasong, Wang Lishuan, Jiang Chenghui, *et al.*. Dispersive properties of optical constants of SiO_2 films in the visible and infrared regions [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1031002.
刘华松, 王利栓, 姜承慧, 等. SiO_2 薄膜的可见光与红外波段光学常数的色散特性[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1031002.
- 11 Van Nijnatten P. Optical analysis of coatings by variable angle spectrophotometry [J]. Thin Solid Films, 2008, 516(14): 4553-4557.
- 12 Van Nijnatten P. An automated directional reflectance/transmittance analyser for coating analysis [J]. Thin Solid Films, 2003, 442(1): 74-79.
- 13 M G Hutchins, P Ageorges. Angular-dependent spectral optical properties of architectural glazings: results of an interlaboratory comparison of measurements [C]. SPIE, 1993, 2017: 13-24.
- 14 Y Liu, J Zhang, X Cheng, *et al.*. Method for accurate measurement of wideband transmittance of thin-film coatings at large angle of incidence [J]. Appl Opt, 2013, 52(2): 226-230.
- 15 M Hutchins, A Topping, C Anderson, *et al.*. Measurement and prediction of angle-dependent optical properties of coated glass products: results of an inter-laboratory comparison of spectral transmittance and reflectance [J]. Thin Solid Films, 2001, 392(2): 269-275.
- 16 W R Hunter, D Eaton, C Sah. The effects of polarizer ellipticity on ellipsometry measurements [J]. Surface Sci, 1970, 20(2): 355-376.
- 17 M Yamamoto, Y Takubo, S Murayama. Detection limit of resonant magneto-optic spectroscopy [J]. Jpn J Appl Phys, 1984, 23(6): 783.
- 18 P A Van Nijnatten. A spectrophotometer accessory for directional reflectance and transmittance of coated glazing [J]. Solar Energy, 2002, 73(3): 137-149.

栏目编辑：何卓铭