

# 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

吴素勇 龙兴武 杨开勇

(国防科技大学光电科学与工程学院光电工程系, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 基于对椭偏测量数据中难以消除的系统误差的作用机理分析,提出了一种新型的薄膜光学参数表征误差处理技术。建议选取薄膜椭偏角关于折射率和几何厚度的一阶偏导数,对大部分测量入射角满足符号相反或只有其中一个为零的条件的波段,剔除偏导数对全部测量入射角满足符号相同或同时为零的条件的奇点波长附近波段,作为反演表征用的椭偏测量数据采集区域,以最小化椭偏测量系统误差引起的薄膜光学参数反演表征值相对真实值的偏差大小。其本质是通过一阶偏导数筛选测量数据,来最小化椭偏测量系统误差对薄膜光学参数表征的误差传递作用。通过数值模拟实验,对比研究了该技术对不同测量入射角范围的适用性及实施技巧,以可复现的数值实验数据和合理的理论解释支持和验证了这种误差处理技术的可靠性,为薄膜在线表征和镀膜监控提供了一定的参考价值。

**关键词** 薄膜;光学参数表征;偏导数筛选;系统误差;椭偏法

**中图分类号** O484.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0631001

## Technique to Minimize the Characterization Deviations of Optical Parameters of Thin Films Caused by Ellipsometric Measurement Systematic Errors

Wu Suyong Long Xingwu Yang Kaiyong

(Department of Optoelectronic Engineering, College of Optoelectronic Science and Engineering,  
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** A novel errors treatment technique to optical-parameters characterization of thin films is presented based on the effect analysis of systematic errors which are hard to eliminate in ellipsometric measurement data. In order to minimize the characterization deviations of thin film optical parameters from the real values caused by ellipsometric measurement systematic errors, it is advised to select ellipsometric measurement data used in optical characterization from spectral bands characterized with opposite signs or single zero of first-order ellipsometric angles' partial derivatives with respect to layer thickness and refractive index for most measurement incident angles, and to exclude spectral bands characterized with the same signs or both zeros of ellipsometric angles' first-order partial derivatives for all measurement incident angles. The essence of this technique is to minimize the errors transfer effect of measurement data on thin-film optical-parameters characterization through spectral band selection of ellipsometric measurement by first-order partial derivatives analysis. Through numerical simulations, its applicability and selection skills of the range of measurement incident angles are compared and studied. The reliability of this technique is supported by resumable numerical experimental results and reasonable theoretical explanations. This novel errors-treatment technique provides a certain reference to *in-situ* characterization and thickness monitoring of thin films.

**Key words** thin films; optical-parameters characterization; selection by partial derivatives; systematic errors; ellipsometric method

**OCIS codes** 310.3840; 310.6860

收稿日期: 2011-11-11; 收到修改稿日期: 2012-01-12

作者简介: 吴素勇(1984—),男,博士研究生,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: sywu2001@163.com

导师简介: 龙兴武(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事激光与光电子技术等方面的研究。

E-mail: xwlong110@sina.com

## 1 引 言

薄膜材料光学参数的表征是指利用一定的测量设备、测试方法和数据处理技术直接或间接地确定单层膜的几何厚度、折射率和消光系数等光学参数,其准确表征是设计和镀制高质量光学薄膜的重要基础。有些表征技术只能测定一个光学参数,如台阶仪和干涉条纹位移法只能单独测量膜层厚度,布儒斯特角法(Abeles法)只能测量折射率,激光量热法只能测量消光系数等<sup>[1,2]</sup>。而多数表征技术都通过测量薄膜的光学性能来间接地反演确定其多个光学参数,如极值法<sup>[3]</sup>、包络线法<sup>[4~7]</sup>,基于分光光度计的光度法<sup>[8~12]</sup>、表面等离子体激元法<sup>[13]</sup>、棱镜耦合薄膜波导法<sup>[14]</sup>和椭偏测量法等<sup>[15~19]</sup>。其中椭偏法测量的本质是将薄膜的反射(或透射)振幅和相位信息转化成角度信息测量,而现有角度测量设备的精度很高,使得椭偏角的测量精度也很高,例如美国Wollam公司WVASE型椭偏仪的重复测量精度高达 $\Psi \pm 0.015^\circ$ 和 $\Delta \pm 0.008^\circ$ <sup>[20]</sup>。另外,相比于光度数据,椭偏角对薄膜材料的光学参数的灵敏度较大,对其光学参数的微小变化响应较光度法更灵敏。这两个因素,使得椭偏法成为薄膜材料光学参数表征技术中最灵敏的方法之一。

影响椭偏法表征精度的因素有很多,如待测薄膜数学模型简化的合理性,待测薄膜样品制备的缺陷水平,薄膜测量数据中存在的系统误差和随机误差,所使用的表征算法的性能优劣以及数据处理方面的技巧等。理论结果与实验数据吻合与否主要取决于实际薄膜与表征中采用的模型的近似程度,结果的不一致往往指向其结构上的奇异点。通常,关于待测薄膜的事先经验信息,可以为反演表征所用的薄膜简化物理模型的选取提供借鉴,确保反演所得的模型参数不会明显缺乏物理意义。另外,椭偏测量数据总是存在一定的难以消除的系统误差,典型的椭偏系统误差来自测量光源和光谱记录设备的不稳定性,使得椭偏角光谱发生上下平移或左右波长变化,其大小常与校准误差、入射角误差、单色仪零偏、有限光波宽度、测量时间和探测器非线性等因素相关。显然,应该努力减小椭偏测量数据中的系统误差,如可以在每次新的测量前进行归一化处理,但是事实上系统误差总是不可避免地存在于测量数据中,在线测量时更为突出,因为仪器的校准和标定更为复杂<sup>[21]</sup>。目前,关于光谱测量数据误差对薄膜光学参数反演的影响已经发表了一些有参考价值的分析结果<sup>[5,12,21~24]</sup>,但关于最小化椭偏测量系统误

差的误差传递作用的深入研究却很少报道。

## 2 技术思想

为了减小由椭偏测量系统误差造成的薄膜光学参数反演表征值相对真实值的偏差,有两种可行方案:1)减小椭偏测量系统误差自身的大小,可以通过采用各种稳定措施和校准技术来实现,但是难以完全消除椭偏测量数据中的系统误差。2)减小椭偏测量误差对薄膜光学参数反演表征值的误差传递作用。薄膜光的理论表明<sup>[1]</sup>,薄膜的膜层参数误差造成的椭偏角偏差,可以由椭偏角对膜层参数的偏导数作泰勒展开作高精度近似,其中的偏导数起的是误差传递的“桥梁”作用。同理,椭偏测量系统误差与其引起的薄膜光学参数表征偏差之间也是通过椭偏角对膜层参数的偏导数这一“桥梁”来传递影响的。由于膜层参数误差或椭偏角偏差相对各自的值都是小量,通常一阶近似展开,就能较准确地描述这一误差传递效应,即

$$\delta\Psi = \frac{\partial\Psi}{\partial n}\delta n + \frac{\partial\Psi}{\partial d}\delta d, \quad \delta\Delta = \frac{\partial\Delta}{\partial n}\delta n + \frac{\partial\Delta}{\partial d}\delta d. \quad (1)$$

薄膜光学理论表明<sup>[1]</sup>,不同波长或入射角处薄膜椭偏角关于膜层几何厚度和折射率的一阶偏导数大小和符号一般不同,相同的膜层参数误差会导致不同程度的椭偏角偏差,偏导数同时为零的奇点处即使出现较大的膜层参数误差,椭偏角变化也很小。相反地,在相同的椭偏测量误差下,一阶近似时,椭偏角对折射率和几何厚度的一阶偏导数同时为零的奇点处的膜层参数误差可能相对很大。偏导数符号相反或只有其中一个为零的波段或入射角区域,理论上由于偏导数传递系统误差影响的作用相消叠加,膜层参数表征值相对真实值的偏差会变小,其中的一阶偏导数发挥了类似缩小功能的“桥梁”作用。而偏导数符号相同的波段或入射角区域,由于偏导数的误差传递作用相长叠加,反而加剧了椭偏测量系统误差对薄膜光学参数表征的影响,其中的偏导数发挥了类似放大功能的“桥梁”作用。

这一理论猜想本质上是利用薄膜椭偏角对膜层参数的一阶偏导数的准确零点位置和符号信息,来筛选适合反演表征的波段和入射角区域,以最小化椭偏测量系统误差对膜层参数表征精度的影响,可望在相同的椭偏测量精度下,获得更准确的薄膜光学参数值。当然,其正确性和有效性有待下一节的基于椭偏法的薄膜光学参数反演表征的数值模拟实验的验证。

### 3 减小测量系统误差对薄膜表征影响的模拟实验

在开始讨论薄膜的椭偏角测量系统误差对其光学参数表征的影响之前,先引入基于椭偏测量的薄膜材料光学参数表征的物理和数学模型。本文采用的表征数学模型建立在椭偏光谱偏差函数的最小化基础上,该偏差函数以待测膜的光学参数为优化变量,其函数值评价待测膜的模型椭偏角数据与测量椭偏角数据的拟合接近程度。根据反射椭偏角  $\Psi$ ,  $\Delta$  的定义式,有

$$\tan \Psi \exp(i\Delta) = r_p / r_s, \quad (2)$$

其中  $r_p, r_s$  分别为 p 偏振光和 s 偏振光的在待测薄膜中的振幅反射率。在椭偏光谱偏差函数中,模型椭偏角数据为在待测膜的物理简化模型下理论计算的椭偏角值,测量椭偏角数据为椭偏仪给出的椭偏角实际测量值。为了探讨不同波长处的椭偏角测量误差引起的薄膜光学参数反演表征偏差的大小区别和规律,采用单波长、变入射角测量的椭偏角数据进行反演模拟计算,椭偏光谱偏差函数定义为

$$S_{DF} = \left\{ \frac{1}{2L} \sum_{l=1}^L \left\{ \left[ \frac{\Psi(\gamma_l) - \tilde{\Psi}(\gamma_l)}{\delta\Psi_l} \right]^2 + \left[ \frac{\Delta(\gamma_l) - \tilde{\Delta}(\gamma_l)}{\delta\Delta_l} \right]^2 \right\} \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

式中  $\tilde{\Psi}(\gamma_l), \tilde{\Delta}(\gamma_l), \Psi(\gamma_l), \Delta(\gamma_l)$  和  $\delta\Psi_l, \delta\Delta_l$  分别为待测薄膜在入射角  $\gamma_l$  处的实测椭偏角、理论模型计算椭偏角和椭偏角测量精度(都设为  $0.1^\circ$ ),  $L$  为选取的总入射角数目。当所有测量点的模型计算椭偏角与实测椭偏角的偏差小于椭偏角测量精度时,偏差函数值小于 1,其值可作为确保反演质量的一个参考判据。

表征计算中所使用的优化算法是基于精英保留策略的遗传算法和采用 Levenberg-Marquardt 算法的非线性最小二乘法组成的混合方法。该混合优化方法首先充分利用遗传算法的全局寻优能力,来搜索并收敛到薄膜真实光学参数附近的区域,解决了初值点不易选取的难题。再利用采用 Levenberg-Marquardt 算法的非线性最小二乘法,对遗传算法所得反演结果进行局部精细优化,以克服遗传算法一定程度的随机性和局部收敛效率不高的不足,稳定地确定薄膜的光学参数。这种算法寻优的卓越性能已经在膜系设计和反向工程的实践中得到充分验证<sup>[25,26]</sup>,对于变量更少的薄膜光学参数反演表征更加方便。下一节的数值计算也表明,如果测量数据不存在误差,该混合算法能以很高的精度多次稳定

地收敛于薄膜的真实光学参数,可以认为不存在算法误差。

根据第 2 节的技术思想,分析椭偏测量数据中的系统误差对薄膜光学参数反演表征的影响,首先要解决的是薄膜椭偏角关于膜层光学参数的一阶偏导数的零点位置及符号信息的准确确定,差分近似带来的算法误差是不允许的,应该要有数学上严格的解析模型来准确计算相应的一阶偏导数<sup>[27]</sup>。以光学厚度为  $1/4$  中心波长(设为  $632.8 \text{ nm}$ )的单层  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜为例,从空气中入射,其中  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜和基片的折射率色散公式分别为

$$n_1 = \sqrt{4.1869 + 0.13158 \times (1000/\lambda)^2}, \quad (4)$$

$$n_2 = \sqrt{2.104923 + 0.00838878 \times (1000/\lambda)^2}, \quad (5)$$

波长  $\lambda$  的单位为  $\text{nm}$ 。为了简化和突出重点,原理分析上可以不考虑基片后表面反射光的非相干叠加影响,也不考虑折射率不均匀性和表面粗糙度等膜层缺陷(对离子镀沉积的单层薄膜较为典型,比较适合本单位的实际镀膜环境)。

图 1 和图 2 分别给出了光学厚度为  $1/4$  中心波长( $632.8 \text{ nm}$ )的单层  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜在  $0^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$  入射时在  $300 \sim 1200 \text{ nm}$  波段的理论模型计算椭偏角  $\Psi, \Delta$  及其关于膜层几何厚度和折射率的一阶偏导数曲线。为了更细致地分析椭偏角偏导数的光谱特征和入射角特性,特别是在偏导数光谱曲线变化剧烈的入射角(如布儒斯特角)附近,实际分析中上述画图对更多的入射角进行。出于简洁和曲线间便于识别区分的考虑,图 1 和图 2 并未将所有的曲线同时绘制出来。对椭偏角  $\Psi$ ,从图 1 可以看出,当入射角从小角度逐渐增大至薄膜布儒斯特角( $64^\circ \sim 67^\circ$ ,因  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜折射率色散,不同波长处略有偏差)时,  $\partial\Psi/\partial d$  和  $\partial\Psi/\partial n$  光谱曲线的特征形状基本保持不变,两零点一个位于近紫外,一个位于可见光波段,不同入射角时的零点位置较为集中且向短波方向轻微平移,只是在第一零点处的幅度先增大至基片布儒斯特角(约  $56^\circ$ )时达最大后再变小。当入射角超过薄膜布儒斯特角不多时,  $\partial\Psi/\partial d$  和  $\partial\Psi/\partial n$  光谱曲线的特征形状发生了负向的近似对称变化,零点位置变化不变,但数值基本变号。当入射角达  $70^\circ$  时,  $\partial\Psi/\partial d$  和  $\partial\Psi/\partial n$  光谱曲线出现了新的形状特征,除了具有负向的近似对称变化外,特别是  $\partial\Psi/\partial n$  的第二零点位置往长波方向有较大移动,但随着入射角继续增大,  $\partial\Psi/\partial n$  的第二零点位置逐渐往短波平移。对椭偏角  $\Delta$ ,从图 2 可以看出,当

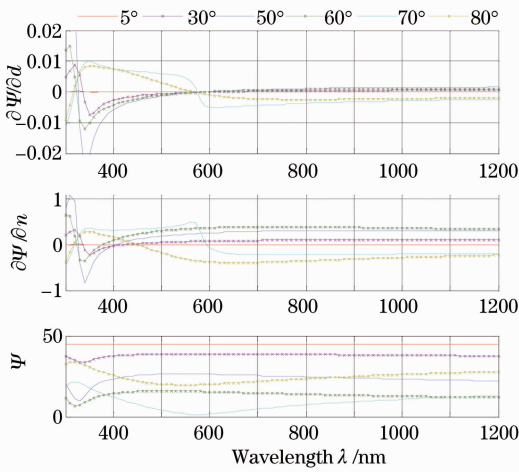


图 1 光学厚度为  $1/4$  中心波长 (632.8 nm) 的单层  $Ta_2O_5$  薄膜在不同角度入射时的理论模型计算椭偏角  $\Psi$  及其对膜层几何厚度、折射率的偏导数光谱曲线  
 Fig. 1 Ellipsometric angle  $\Psi$  and its partial derivatives with respect to layer thickness and refractive index by the theoretical model of quarter-wave layer  $Ta_2O_5$  film with central wavelength of 632.8 nm at different incident angles

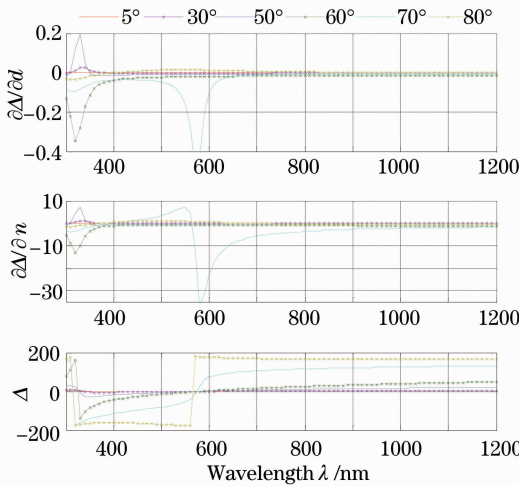


图 2 光学厚度为  $1/4$  中心波长 (632.8 nm) 的单层  $Ta_2O_5$  薄膜在不同角度入射时理论模型计算椭偏角  $\Delta$  及其对膜层几何厚度、折射率的偏导数光谱曲线  
 Fig. 2 Ellipsometric angle  $\Delta$  and its partial derivatives with respect to layer thickness and refractive index by the theoretical model of quarter-wave layer  $Ta_2O_5$  film with central wavelength of 632.8 nm at different incident angles

入射角从小角度逐渐增大至基片布儒斯特角 (约  $56^\circ$ ) 时,  $\partial\Delta/\partial d$  和  $\partial\Delta/\partial n$  光谱曲线的特征形状基本保持不变, 两零点位于近紫外波段, 位置较为接近且有相互靠拢的趋势, 同时向短波方向轻微平移, 在两

零点间的偏导数幅度逐渐增大至最大。当入射角超过基片布儒斯特角 (约  $56^\circ$ ) 而不大于薄膜布儒斯特角 ( $64^\circ \sim 67^\circ$ ) 时,  $\partial\Delta/\partial d$  和  $\partial\Delta/\partial n$  光谱曲线的特征形状发生了负向的近似对称变化, 且偏导数都为负值, 零点消失。当入射角达  $70^\circ$  时,  $\partial\Delta/\partial d$  和  $\partial\Delta/\partial n$  光谱曲线出现了新的形状特征, 重新出现零点, 其位置分布于可见和近红外波段, 随着入射角继续增大, 零点位置有相互远离的趋势, 即可见区的第一零点往短波方向移动, 近红外的第二零点往长波方向移动。

数值模拟计算时, 对给定的单层  $Ta_2O_5$  薄膜, 由于  $5^\circ \sim 56^\circ$  入射角内的椭偏角偏导数  $\partial\Psi/\partial d$ ,  $\partial\Psi/\partial n$ ,  $\partial\Delta/\partial d$  和  $\partial\Delta/\partial n$  的曲线随着入射角的增大往短波方向单调地轻微平移。简单起见, 先在  $5^\circ \sim 50^\circ$  入射角内的理论模型计算反射率数据中人为引入  $0.1^\circ$  的正向椭偏角测量系统误差, 作为反演表征用的模拟的实测椭偏角数据。利用前述的混合优化算法, 并考虑基底和薄膜折射率的色散, 在  $300 \sim 1200$  nm 波段的不同波长处进行反演计算, 所得的薄膜的光学参数的反演估计值  $n, d$ 、椭偏光谱偏差函数大小  $S_{DF}$ 、反演估计值  $n, d$  相对真实值  $\bar{n}, \bar{d}$  的偏差大小  $\Delta n, \Delta d$  及其在  $5^\circ$  和  $50^\circ$  入射时的椭偏角偏导数的零点位置和符号信息都列于表 1 中。同时, 图 3 给出了  $380$  nm 处在  $5^\circ \sim 50^\circ$  入射角内  $0.1^\circ$  的正向椭偏角

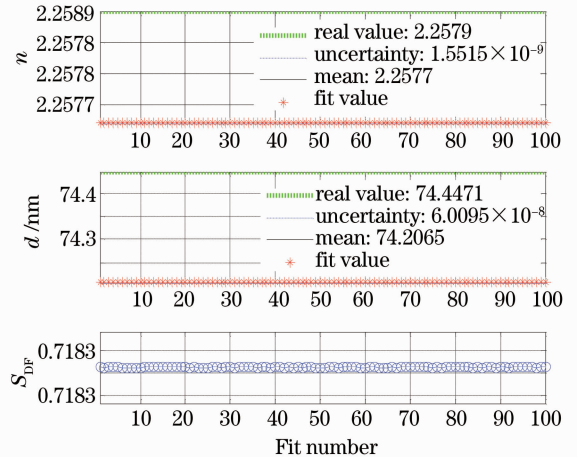


图 3  $380$  nm 处在  $5^\circ \sim 50^\circ$  入射角内  $0.1^\circ$  的正向椭偏角测量系统误差下 100 次反演得到的单层  $Ta_2O_5$  薄膜的折射率、几何厚度和偏差函数值分布

Fig. 3 Distribution of refractive index, thickness and discrepancy function value of the investigated  $Ta_2O_5$  film obtained by 100-time inversion with  $0.1^\circ$  positive systematic ellipsometric-angles measurement error at  $380$  nm in range of the incident angle  $5^\circ \sim 50^\circ$

测量系统误差下 100 次反演计算得到单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜的折射率、几何厚度和光谱偏差函数估计值的分布情况。可以看出，上述的混合优化算法能以很高的精度多次重复地收敛于同一估计值，例证了其稳定性和全局收敛能力。

观察表 1 中经表征算法所得的折射率和几何厚度拟合值与真实值的偏差大小规律，发现的确存在某些波段的表征偏差明显小于其他波段，且波段边界主要由  $\partial\Psi/\partial d$  和  $\partial\Psi/\partial n$  的零点位置决定， $\partial\Delta/\partial d$  和  $\partial\Delta/\partial n$  的作用相对比较弱，只在  $\partial\Psi/\partial d$  和  $\partial\Psi/\partial n$  的非奇点零点附近， $\partial\Delta/\partial d$  和  $\partial\Delta/\partial n$  的符号相反波段的贡献才明显。观察表 1 给出的 5° 和 50° 的椭偏角偏导数零点位置和符号信息，发现表征偏差小的波段的椭偏角偏导数对 5°~50° 内的大部分入射角满足符号相反或只有一个为零的条件，表征偏差大

的波段的椭偏角偏导数  $\partial\Psi/\partial d$  和  $\partial\Psi/\partial n$  对 5°~50° 内的所有入射角满足符号相同或同时为零的条件， $\partial\Delta/\partial d$  和  $\partial\Delta/\partial n$  对 5°~50° 内的大部分入射角满足符号相同或同时为零的条件。这一规律与上节提出的技术思想在原理上不谋而合，表明了其在减小椭偏角测量系统误差对薄膜材料光学参数反演表征造成的偏差大小上的可行性。同时，适合反演波段和不适合反演波段的表征偏差不像光度法<sup>[24]</sup>那么显著，这可能是由于椭偏角偏振信息  $\Delta$  的增加导致与光度信息  $\Psi$  出现了部分误差相消叠加造成的。

下面对 5°~80° 入射角范围内的理论模型计算椭偏角施加 0.1° 的正向椭偏测量系统误差，同表 1 一样，在 300~1200 nm 内不同波长处开展反演实验，所得的相应折射率和几何厚度反演值相对真实值的偏差结果列于表 2 中，相应的曲线如图 4 和 5 所示。

表 1 5°~50° 入射角内 0.1% 的正向椭偏角测量系统误差在不同波长处引起的光学厚度为四分之一中心波长 (632.8 nm) 的单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜的折射率和几何厚度表征偏差情况

Table 1 Characterization deviations of the refractive index and thickness of the investigated quarter-wave Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> film with central wavelength at 632.8 nm caused by 0.1% positive systematic error of ellipsometric angles measurement with different wavelengths at incident angles from 5° to 50°

	$\lambda/\text{nm}$	$\bar{n}$	$\bar{d}/\text{nm}$	$S_{DF}$	$n$	$d/\text{nm}$	$\Delta n/10^{-3}$	$\Delta d/\text{nm}$	5°				50°			
									$\frac{\partial\Psi}{\partial d}$	$\frac{\partial\Psi}{\partial n}$	$\frac{\partial\Delta}{\partial d}$	$\frac{\partial\Delta}{\partial n}$	$\frac{\partial\Psi}{\partial d}$	$\frac{\partial\Psi}{\partial n}$	$\frac{\partial\Delta}{\partial d}$	$\frac{\partial\Delta}{\partial n}$
Dangerous band	300.0	2.3767		0.6367	2.4023	73.5056	25.5303	-0.9414	+	+	-	-	+	+	-	-
	308.7	2.3596		0.6659	2.3801	73.7279	20.4718	-0.7191	+	+	-	-	+	+	-	0
	309.0	2.3590		0.6678	2.3791	73.7431	20.0957	-0.7039	+	+	-	0	+	+	0	+
	314.0	2.3498		0.7217	2.3619	74.0464	12.1419	-0.4007	+	+	0	+	+	+	+	+
	327.2	2.3272		0.7652	2.4414	70.5813	114.1753	-3.8658	+	+	+	+	0	0	+	+
	342.8	2.3036	74.4471	0.9265	2.2896	74.9113	-13.9967	0.4642	0	0	+	+	-	-	+	+
	346.5	2.2984		0.9192	2.2793	75.0369	-19.1858	0.5899	-	-	+	+	-	-	+	0
	348.0	2.2964		0.9109	2.2769	75.0291	-19.5355	0.5821	-	-	+	+	-	-	0	-
Recommended band	370.0	2.2689		0.7487	2.2647	74.3682	-4.2422	-0.0789	-	-	+	0	-	-	-	-
	372.4	2.2662		0.7393	2.2631	74.3216	-3.0569	-0.1254	-	-	+	-	-	-	-	-
	381.0	2.2568		0.7163	2.2570	74.1942	0.1182	-0.2529	-	-	0	-	-	-	-	-
	403.2	2.2352		0.6913	2.2395	74.0128	4.2748	-0.4343	-	-	-	-	-	0	-	-
	426.0	2.2163		0.6796	2.2227	73.9116	6.3757	-0.5355	-	0	-	-	-	+	-	-
	451.0	2.1986		0.6710	2.2064	73.8386	7.8254	-0.6084	-	+	-	-	-	+	-	-
	510.0	2.1663		0.6590	2.1761	73.7302	9.8322	-0.7169	-	+	-	-	-	+	-	-
	576.0	2.1409		0.6522	2.1520	73.6507	11.1096	-0.7964	-	+	-	-	-	+	-	-
	593.6	2.1355		0.6510	2.1469	73.6330	11.3696	-0.8140	-	+	-	-	0	+	-	-
	632.0	2.1252		0.6488	2.1370	73.5977	11.8667	-0.8493	0	+	-	-	+	+	-	-
Dangerous band	650.0	2.1209		0.6479	2.1330	73.5825	12.0742	-0.8646	+	+	-	-	+	+	-	-
	850.0	2.0902		0.6418	2.1040	73.4471	13.7901	-1.0000	+	+	-	-	+	+	-	-
	1000	2.0781		0.6394	2.0928	73.3738	14.6754	-1.0732	+	+	-	-	+	+	-	-
	1040	2.0757		0.6390	2.0906	73.3578	14.8710	-1.0893	+	+	-	0	+	+	-	-
	1108	2.0722		0.6384	2.0874	73.3338	15.1688	-1.1132	+	+	-	+	+	+	-	-
	1200	2.0684		0.6378	2.0839	73.3084	15.5061	-1.1387	+	+	-	+	+	+	-	-

表 2 不同入射角范围内 0.1° 的正向椭圆偏角测量系统误差在不同波长处引起的光学厚度为四分之一中心波长 (632.8 nm) 的单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜的折射率和几何厚度反演表征偏差对比情况

Table 2 Characterization deviations of the refractive index and thickness of the investigated quarter-wave Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> film with central wavelength at 632.8 nm caused by 0.1% positive systematic error of ellipsometric angles measurement with different wavelengths in different incident angle range

	$\lambda/\text{nm}$	$\Delta n/10^{-3}$					
		5°~80°	50°~66°	71°~80°	50°~70°	50°~80°	50°~85°
Dangerous band	300.0	9.3262	8.0231	37.6148	6.7075	5.4048	5.1544
	308.7	13.7262	9.5867	185.3964	8.8863	8.0857	7.9058
	309.0	13.9598	9.6989	199.4848	9.0189	8.2373	8.0609
	314.0	20.2114	13.2941	333.9836	13.0298	12.7553	12.6979
	327.2	97.5159	54.5708	303.4969	65.2080	87.4417	96.1571
Recommended band	342.8	0.5044	-2.0682	44.6621	-0.1814	3.2234	4.1596
	346.5	0.0963	-0.9128	35.2831	0.5459	3.3448	4.1377
	348.0	0.0780	-0.5771	32.3861	0.7395	3.3521	4.1015
	370.0	0.8878	1.1883	13.0173	1.2511	2.5559	2.9876
	372.4	0.9280	1.2503	12.0394	1.2229	2.4569	2.8688
	381.0	1.0036	1.4197	9.2406	1.1042	2.1339	2.4850
	403.2	0.9752	1.7171	4.9110	0.8052	1.5271	1.7638
	426.0	0.8736	2.0079	2.5624	0.5672	1.1439	1.2987
	451.0	0.7596	2.3861	1.1694	0.3626	0.8719	0.9615
	510.0	0.4496	3.6570	-0.0245	0.0101	0.4387	0.4474
	576.0	-0.0037	5.0874	-2.0362	2.7615	-0.1652	-0.2162
	593.6	-0.0818	5.2194	0.1427	0.2727	-0.1057	-0.1140
	632.0	-0.1915	5.0693	-0.2243	0.2206	-0.2429	-0.2625
	650.0	-0.2108	4.8673	-0.4031	0.2728	-0.2827	-0.3102
	850.0	0.0937	3.0950	-1.5616	0.7266	-0.2661	-0.3757
	1000	0.4965	2.7921	-1.4618	0.9901	-0.0862	-0.2330
	1040	0.6069	2.7638	-1.3567	1.0541	-0.0330	-0.1869
	1108	0.7942	2.7412	-1.1249	1.1583	0.0595	-0.1044
	1200	1.0454	2.7437	-0.7237	1.2919	0.1867	0.0127
		$\lambda/\text{nm}$	$\Delta d/\text{nm}$				
		5°~80°	50°~66°	71°~80°	50°~70°	50°~80°	50°~85°
Dangerous band	300.0	-0.4080	-0.3473	-1.6396	-0.2958	-0.2449	-0.4080
	308.7	-0.5615	-0.3938	-6.8249	-0.3675	-0.3376	-0.5615
	309.0	-0.5697	-0.3976	-7.2716	-0.3721	-0.3430	-0.5697
	314.0	-0.7921	-0.5245	-11.0368	-0.5153	-0.5061	-0.7921
	327.2	-3.3264	-1.9003	-9.4348	-2.2591	-2.9972	-3.3264
Recommended band	342.8	-0.0271	0.0501	-1.3404	-0.0103	-0.1180	-0.1474
	346.5	-0.0187	0.0098	-1.0128	-0.0354	-0.1211	-0.1453
	348.0	-0.0200	-0.0018	-0.9110	-0.0420	-0.1210	-0.1435
	370.0	-0.0599	-0.0648	-0.2246	-0.0633	-0.0935	-0.1035
	372.4	-0.0619	-0.0674	-0.1902	-0.0631	-0.0906	-0.0998
	381.0	-0.0663	-0.0748	-0.0935	-0.0619	-0.0815	-0.0881
	403.2	-0.0683	-0.0887	0.0426	-0.0586	-0.0658	-0.0680
	426.0	-0.0653	-0.1014	0.0968	-0.0558	-0.0562	-0.0555
	451.0	-0.0593	-0.1170	0.1100	-0.0526	-0.0481	-0.0456
	510.0	-0.0353	-0.1757	0.0801	-0.0411	-0.0276	-0.0249
	576.0	-0.0025	-0.2831	0.0797	-0.1639	0.0063	0.0091
	593.6	-0.0020	-0.3092	0.0231	-0.0525	0.0016	0.0029
	632.0	-0.0134	-0.3482	0.0504	-0.0670	-0.0041	-0.0010
	650.0	-0.0201	-0.3583	0.0567	-0.0799	-0.0076	-0.0035
	850.0	-0.1241	-0.3858	-0.0580	-0.1860	-0.0703	-0.0569
	1000	-0.2046	-0.4144	-0.2390	-0.2448	-0.1203	-0.1028
	1040	-0.2252	-0.4229	-0.2908	-0.2587	-0.1330	-0.1148
	1108	-0.2591	-0.4375	-0.3808	-0.2810	-0.1539	-0.1347
	1200	-0.3032	-0.4566	-0.5059	-0.3088	-0.1810	-0.1607

对比观察表 2 中 5°~80° 和表 1 中 5°~50° 的入射角范围内的表征偏差结果,发现在表 1 中原来的

紫外区的不适合反演波段,两者的表征偏差基本相当,但前者的边界往短波方向移动,即带宽缩小了,

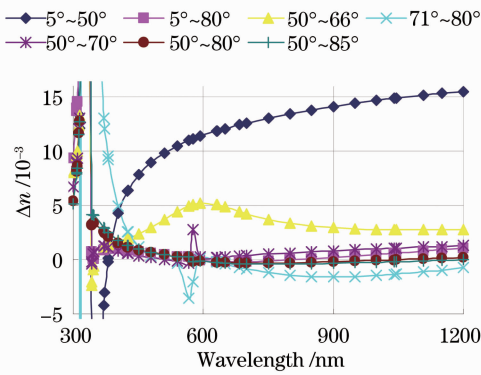


图4 不同入射角范围内  $0.1^\circ$  的正向椭偏角测量系统误差在不同波长处引起的光学厚度为  $1/4$  中心波长 ( $632.8\text{ nm}$ ) 的单层  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜的折射率的表征偏差  
 Fig. 4 Characterization deviations of the refractive index of the investigated quarter-wave layer  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  film with central wavelength at  $632.8\text{ nm}$  caused by  $0.1\%$  positive systematic error of ellipsometric angles measurement with different wavelengths in different incident angle range

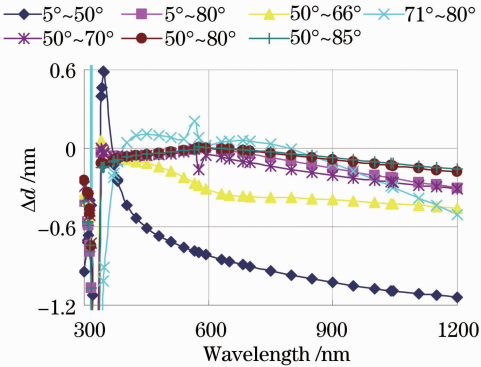


图5 不同入射角范围内  $0.1^\circ$  的正向椭偏角测量系统误差在不同波长处引起的光学厚度为  $1/4$  中心波长 ( $632.8\text{ nm}$ ) 的单层  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜的几何厚度的表征偏差  
 Fig. 5 Characterization deviations of the thickness of the investigated quarter-wave layer  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  film with central wavelength at  $632.8\text{ nm}$  caused by  $0.1\%$  positive systematic error of ellipsometric angles measurement with different wavelengths in different incident angle range

这主要是由于  $50^\circ \sim 56^\circ$  入射角范围内  $\partial\Delta/\partial d$  和  $\partial\Delta/\partial n$  的非奇点零点往短波方向移动造成的。而在表1中原来近红外区的不适合反演波段消失了,成为适合反演波段,这主要是由  $70^\circ$  以上入射角内  $\partial\Delta/\partial d$  和  $\partial\Delta/\partial n$  在近红外波段重新出现非奇点零点造成的,如图1和图2所示。而且,在表1中原来的可见光区的适合反演波段,及近红外区新的适合反演波段的表征偏差,都得到了数量级的减小,这主要

是因为  $50^\circ \sim 80^\circ$  入射角内椭偏角偏导数  $\partial\Psi/\partial d$ ,  $\partial\Psi/\partial n$ ,  $\partial\Delta/\partial d$  和  $\partial\Delta/\partial n$  出现的新光谱特征,增强了椭偏角  $\Psi$ ,  $\Delta$  测量系统误差相互间相消叠加的效应。上述表征精度的获得,一方面体现了椭偏法的高灵敏度,另一方面说明合理的椭偏数据筛选对于其反演表征精度影响很大。

综合图1和图2及上面的偏导数特性分析,可以看出,主要有以下两点特征:1) 椭偏角  $\Psi$  在薄膜布儒斯特角附近、椭偏角  $\Delta$  在基片布儒斯特角附近的偏导数曲线都发生了近似对称性的反向变化,且对  $50^\circ$  以上的入射角,椭偏角  $\Delta$  偏导数的非奇点零点的作用与椭偏角  $\Psi$  偏导数的非奇点零点的作用相当,由于  $\Delta$  和  $\Psi$  相互独立,因此椭偏角  $\Delta$  与椭偏角  $\Psi$  的测量系统误差的传递作用彼此间也出现相消叠加的效应,从而使表征精度得到显著提高。2) 当入射角达  $70^\circ$  时,  $\partial\Delta/\partial d$  和  $\partial\Delta/\partial n$  光谱曲线在可见和近红外波段重新出现零点,且随着入射角继续增大零点位置有相互远离的趋势,即可见区的第一零点往短波方向移动,近红外的第二零点往长波方向移动,从而使得近红外区也变成适合反演表征波段。

为了证明上述表征精度数量级提高的理论原因是  $50^\circ \sim 80^\circ$  入射角内椭偏角偏导数  $\partial\Psi/\partial d$ ,  $\partial\Psi/\partial n$ ,  $\partial\Delta/\partial d$  和  $\partial\Delta/\partial n$  出现的新光谱特征导致的椭偏角测量系统误差相互间相消叠加的效应得到增强这一解释,下面仅以  $50^\circ \sim 80^\circ$  入射角内的椭偏角数据进行反演表征,所得结果也列于表2中,相应的曲线如图4和图5所示。观察表2中在  $50^\circ \sim 80^\circ$  与  $5^\circ \sim 80^\circ$  的入射角内所得的反演表征偏差的波段分布及其相应的量级大小,发现二者在适合反演波段与不适合反演波段的分布上都很好地吻合,前者不适合反演波段的表征偏差比后者略小,适合反演波段的表征偏差与后者略有不同,近紫外区的适合反演波段的偏差大于后者,可见光区的适合反演波段的偏差与后者相当,近红外区的适合反演波段的偏差小于后者,整体在量级上较为接近,充分证实了上述对椭偏法高表征精度提出的理论解释的合理性。而二者在适合反演波段的表征精度上的小差别,是由  $5^\circ \sim 50^\circ$  入射角内的椭偏数据误差与  $50^\circ \sim 80^\circ$  入射角内的椭偏数据误差还存在部分性的相长或相消的效应造成的,只是这种效应比较弱。

根据上面的分析,至少应该包含基片布儒斯特角(约  $56^\circ$ )和薄膜布儒斯特角( $64^\circ \sim 67^\circ$ )附近的入射角(对应于偏导数新光谱特征一)以及  $70^\circ$  以上的入射角(对应于偏导数新光谱特征二)的椭偏数据。

至于入射角小于  $50^\circ$  的椭偏角数据,则可根据实际测量方便的情况可以添加或不添加,并不本质性地影响适合反演波段的表征精度。

为了找到最有利的入射角范围,下面分别以  $50^\circ\sim 66^\circ$ ,  $71^\circ\sim 80^\circ$ ,  $50^\circ\sim 70^\circ$  和  $50^\circ\sim 85^\circ$  的入射角范围的椭偏角数据来进行反演表征数值实验,为了便于对比,所得的表征偏差结果一起列于表 2 中,相应的曲线如图 4 和图 5 所示。 $50^\circ\sim 66^\circ$  和  $71^\circ\sim 80^\circ$  这两个入射角范围的椭偏法数值模拟实验的目的,是探讨当值满足椭偏角偏导数新光谱特征的其中一个时,表征精度和波段分布会如何变化,以进一步证实同时满足这两个特征的必要性。 $50^\circ\sim 70^\circ$  和  $50^\circ\sim 85^\circ$  以及前述的  $50^\circ\sim 80^\circ$  这三个人射角范围的椭偏法数值模拟实验的目的,是探讨当同时满足椭偏角偏导数的上述二个新光谱特征时,增加更多的  $70^\circ$  以上的入射角的椭偏数据对表征精度和波段分布有何影响,以确定最合适入射角采集范围。

对比表 2 中  $50^\circ\sim 66^\circ$  和  $50^\circ\sim 80^\circ$  两个人射角范围内的表征偏差结果,观察图 4 和图 5 中的相应曲线可知,两者入射角范围都包含了  $56^\circ$  附近和布儒斯特角 ( $64^\circ\sim 67^\circ$ ) 附近的入射角,而适合反演波段的短波边界由小于  $56^\circ$  附近的  $\partial\Delta/\partial d$  和  $\partial\Delta/\partial n$  的非奇点零点波长 ( $334\sim 342$  nm) 决定,因此二者的适合反演波段分布相同。但是,  $50^\circ\sim 66^\circ$  入射角范围在可见和红外波段的表征精度比  $50^\circ\sim 80^\circ$  入射角范围差了约 1 个数量级,而只是因为缺少了  $70^\circ$  以上入射角的椭偏角数据,亦即缺少了椭偏角偏导数的新光谱特征二,可见特征二对于适合反演波段的表征精度的重要性。

对比表 2 中  $71^\circ\sim 80^\circ$  和  $50^\circ\sim 80^\circ$  两个人射角范围内的表征偏差结果,观察图 4 和图 5 中的相应曲线,可以看出,  $71^\circ\sim 80^\circ$  入射角范围的适合反演波段的短波边界往长波方向右移了,由于缺少  $50^\circ\sim 56^\circ$  的入射角椭偏角数据,该短波边界改由  $71^\circ$  的  $\partial\Delta/\partial d$  和  $\partial\Delta/\partial n$  的非奇点零点波长 (约 390 nm) 决定。同时,  $71^\circ\sim 80^\circ$  入射角范围的不适合反演波段的表征精度比  $50^\circ\sim 80^\circ$  入射角范围差了约 1 个数量级,适合反演波段的表征精度也比  $50^\circ\sim 80^\circ$  入射角范围差了数倍,而只是因为缺少了  $50^\circ\sim 70^\circ$  的入射角内的椭偏角数据,亦即缺少了椭偏角偏导数的新光谱特征一,可见特征一对于适合反演波段和不适合反演波段的表征精度都很重要。

对比观察表 2 中  $50^\circ\sim 70^\circ$ ,  $50^\circ\sim 80^\circ$  和  $50^\circ\sim 85^\circ$  三个人射角范围内的表征偏差结果,观察图 4 和

图 5 中的相应曲线,可以看出,随着  $70^\circ$  以上入射角的椭偏角测量数据的增加,不适合反演波段的表征精度变化不大,适合反演波段的近紫外短波区的表征精度逐渐变差(即偏差变大),适合反演波段的近红外长波区的表征精度逐渐变高(即偏差变小),适合反演波段的可见光区的表征精度有增有减、或者一增一减。如果特别关心近紫外区的光学参数值,则建议使用  $50^\circ\sim 70^\circ$  入射角范围的椭偏数据,如果特别关心近红外区的光学参数值,则建议使用  $50^\circ\sim 85^\circ$  入射角范围的椭偏数据,如果特别关心可见光波段的光学参数值,则建议使用  $50^\circ\sim 80^\circ$  入射角范围的椭偏数据,以获得最高的表征精度。

总的看来,对所选入射角范围的椭偏测量数据,椭偏角  $\Psi, \Delta$  对膜层几何厚度和折射率的偏导数对多数测量入射角都满足符号相反的波段,更有利于减小由椭偏测量系统误差造成的薄膜光学参数反演表征偏差,而偏导数对所有测量入射角都满足符号相同或同时为零的奇点及其附近波段最不适合用来进行反演计算,应当予以剔除。同时,由于椭偏角  $\Psi, \Delta$  的独立性,在基片布儒斯特角和薄膜布儒斯特角附近的入射角区域,椭偏角  $\Psi, \Delta$  测量系统误差间出现了彼此间较强烈的误差相消叠加的效应,使得基于布儒斯特角附近一定范围内的椭偏测量数据的椭偏法在适合反演波段的表征精度,较光度法有了进一步的很大提高。特别是椭偏角  $\Delta$  偏导数在布儒斯特角以上入射角时在可见和红外波段出现的非奇点零点特性,显著地拓宽了椭偏法在薄膜材料光学参数表征技术中适合反演波段的带宽,使得在较宽的波长范围内用椭偏法获得准确的光学参数值成为可能。

最后再就上述方法的适用范围作一些讨论。首先,在上面的所有数值模拟实验中,假设所有波长和入射角的椭偏角测量系统误差都相同。事实上,系统误差可能经常与校准误差、入射角误差、单色仪零偏、有限光波宽度、测量时间和探测器非线性等因素有关。对于大部分光谱椭偏测量设备,红外波段的测量系统误差高于其他波段。如果测量只在近紫外和可见光波段展开时,系统误差并不表现很强的波长依赖性。同时,本文的主要目的是揭示椭偏测量系统误差对膜材料光学参数表征影响的定性规律,对系统误差选取更复杂的分布形式可能使上述定性效应的观察复杂化。以上两点,是本文对所有测量波长和入射角都做出上述均匀分布的椭偏测量系统误差假设的主要原因。其次,下面讨论本方法的有



效极限如果椭偏测量数据中系统噪声较大,那直接使用该数据进行薄膜表征是不明智的,应该重新测量或仔细校准测量仪器。如果测量数据中系统误差很大,那么上节的理论分析椭偏测量系统误差的传递作用中使用的椭偏角的一阶近似不再成立,因此椭偏测量系统误差的有效极限为椭偏角的一阶近似分析成立时的有效极限。再次,上述数值模拟实验,针对的是无吸收的各向同性的均匀膜薄膜材料单层样品的光学参数表征,这是最常见的表征情况,也与实验所用离子镀膜环境镀制的单层膜样品最为接近。所得方法在吸收膜或者非均匀膜材料光学参数表征中的可行性是下一步深入研究的方向,目前只证实适用于无吸收的均匀膜样品。最后,虽然模拟中假定的椭偏角测量系统误差幅度为 $0.1^\circ$ ,但实际中椭偏测量的精度可以进一步提高到 $0.01^\circ$ ,系统误差的量级的减小,为椭偏法更准确地测量薄膜的光学参数创造了有利条件。

## 4 结 论

基于对系统误差的误差传递作用机理分析,提出了一种新型的薄膜光学参数表征中椭偏测量数据系统误差处理技术。首先通过解析计算模型,确定待测膜椭偏角对膜层折射率和几何厚度的一阶偏导数的零点位置和符号信息,选取对大多数测量入射角满足一阶偏导数符号相反或只有一个为零的条件的波段,作为最佳椭偏测量数据点采集区域,以使椭偏测量系统误差的作用相消叠加而减弱,剔除对全部测量入射角满足一阶偏导数符号相同或同时为零的奇点波长附近波段,避免椭偏测量系统误差的作用相长叠加而增强,以最小化椭偏系统误差引起的薄膜光学参数相对真实值的偏差大小。同时,由于椭偏角 $\Psi$ 与 $\Delta$ 的独立性,在基片布儒斯特角和薄膜布儒斯特角附近的入射角区域,椭偏角 $\Psi, \Delta$ 测量系统误差间出现了彼此间较强烈的误差相消叠加的效应,使得基于布儒斯特角附近一定范围内的椭偏测量数据的椭偏法在适合反演波段的表征精度方面,较光度法有了进一步的很大提高。特别是椭偏角 $\Delta$ 的一阶偏导数在布儒斯特角以上入射角时在可见和红外波段出现的非奇点零点特性,显著地拓宽了椭偏法在薄膜材料光学参数表征技术中适合反演波段的带宽,使得在较宽的波长范围内用椭偏法获得准确的光学参数值成为可能。通过数值模拟实验,以可复现的数值反演表征偏差数据证实了该技术的可靠性及测量入射角选取技巧,并给出了合理的理论

解释,说明了该新型误差处理技术为薄膜表征和镀膜监控中提供了一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 Sh. A. Furman, A. V. Tikhonravov. Basics of Optics of Multilayer Systems [M]. Gif-sur-Yvette; Editions Frontières, 1992. 221~233
- 2 P. A. Temple. Thin-Film Absorption Measurements Using Laser Calorimetry [M]. E. D. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids. New York: Academic Press Inc., 1985. 135~153
- 3 Y. F. Zheng, K. Kikuchi. Analytical method of determination optical constants of a weakly absorbing thin film [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(25): 6325~6328
- 4 R. Swanepoel. Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon [J]. *J. Phys. E*, 1983, **16**(12): 1214~1222
- 5 Jin Yiqin, Liu Huasong, Zhang Yanmin. Test and analysis of optical film constants [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(5): 513~518  
季一勤, 刘华松, 张艳敏. 光学薄膜常数的测试与分析[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(5): 513~518
- 6 Liang Liping, Hao Jianyin, Qin Mei *et al.*. Determination of the optical constants of sol-gel derived  $ZrO_2$  films simply from the transmission spectra [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(12): 7906~7911  
梁丽萍, 郝建英, 秦梅等. 基于透射光谱确定溶胶凝胶  $ZrO_2$  薄膜的光学常数[J]. *物理学报*, 2008, **57**(12): 7906~7911
- 7 Guo Chun, Lin Dawei, Zhang Yundong *et al.*. Determination of optical constants of  $LaF_3$  films from spectrophotometric measurements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0731001  
郭春, 林大伟, 张云洞等. 光度法确定  $LaF_3$  薄膜光学常数[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0731001
- 8 D. P. Arndt, M. J. Bennett, B. M. A. Azzam *et al.*. Multiple determination of the optical constants of thin-film coating materials [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**: 3571~3596
- 9 J. S. Parramon, J. F. Borrull, S. Bosch *et al.*. Use of information on the manufacture of samples for the optical characterization of multilayers through a global optimization [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(7): 1325~1328
- 10 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]. *物理学报*, 2004, **24**(7): 885~889
- 11 Sun Xilian, Hong Ruijin, Qi Hongji *et al.*. Microstructure and optical constants of sputtered Ag films of different thickness [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(9): 4923~4927  
孙喜莲, 洪瑞金, 齐红基等. 磁溅射不同厚度银膜的微结构及其光学常数[J]. *物理学报*, 2006, **55**(9): 4923~4927
- 12 Jin Weihua, Jin Chunshui, Zhang Lichao *et al.*. Determination of optical constants for aluminum thin film based on combined optimal algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(9): 1582~1588  
金伟华, 金春水, 张立超等. 基于混合优化算法测定铝薄膜光学常数[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1582~1588
- 13 W. P. Chen, J. M. Chen. Use of surface plasma waves for determination of the thickness and optical constants of thin metallic films [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(2): 189~191
- 14 J. Cardin, D. Leduc. Determination of refractive index, thickness, and the optical losses of thin films from prism-film coupling measurements [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(7): 894~900

- 15 G. P. Lariviere, J. M. Frigerio, J. Rivory *et al.*. Estimate of the degree of inhomogeneity of the refractive index of dielectric films from spectroscopic ellipsometry [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(28): 6056~6061
- 16 P. Chindaudom, K. Vedam. Characterization of inhomogeneous transparent substrates by spectroscopic ellipsometry; refractive indices  $n(\lambda)$  of some fluoride-coating materials [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(13): 2664~2671
- 17 Wang Xiaodong, Shen Jun, Wang Shenzhao *et al.*. Optical constants of sol-gel derived  $\text{TiO}_2$  films characterized by spectroscopic ellipsometry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(11): 8027~8032  
王晓栋, 沈 军, 王生钊 等. 椭偏光谱研究溶胶-凝胶  $\text{TiO}_2$  薄膜的光学常数[J]. *物理学报*, 2009, **58**(11): 8027~8032
- 18 Zhang Jitao, Li Yan, Luo Zhiyong. A traceable calibration method for spectroscopic ellipsometry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(1): 186~191  
张继涛, 李 岩, 罗志勇. 一种可溯源的光学椭偏仪标定方法[J]. *物理学报*, 2010, **59**(1): 186~191
- 19 Zhou Yi, Wu Guosong, Dai Wei *et al.*. Accurate determination of optical constants and thickness of absorbing thin films by a combined ellipsometry and spectrophotometry approach [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4): 2356~2363  
周 毅, 吴国松, 代 伟 等. 椭偏与光度联用精确测定吸收薄膜的光学常数与厚度[J]. *物理学报*, 2010, **59**(4): 2356~2363
- 20 J. A. Woollam Co., Inc. Guide to using WVASE32 software for spectroscopic ellipsometry data acquisition and analysis [OL]. <http://www.jawoollam.com>
- 21 A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov, M. A. Kokarev. Effect of systematic errors in spectral photometric data on the accuracy of determination of optical parameters of dielectric thin film [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(13): 2555~2560
- 22 J. M. Pozo, L. Diaz. Method for the determination of optical constants of thin films; dependence on experimental uncertainties [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(22): 4474~4481
- 23 I. Konstantinov, T. Babeva, S. Kitova. Analysis of errors in the thin-film optical parameters derived from spectrophotometric measurements at normal light incidence [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(19): 4260~4267
- 24 Wu Suyong, Long Xingwu, Huang Yun *et al.*. Methods for decreasing optical parameters reverse determination uncertainty of thin films caused by spectral measurement errors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2171~2177  
吴素勇, 龙兴武, 黄 云 等. 减小由光谱测量数据误差造成的薄膜光学参数反演不确定度的方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2171~2177
- 25 Wu Suyong, Long Xingwu, Yang Kaiyong *et al.*. Performance analysis of local optimization algorithm in reverse engineering of multilayer optical coatings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0631001  
吴素勇, 龙兴武, 杨开勇 等. 光学多层薄膜反向工程中局部优化算法的性能分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0631001
- 26 Huang Yun, Wu Suyong, Yang Kaiyong. Active design of multilayer optical coatings based on sensitivity control [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0431002  
黄 云, 吴素勇, 杨开勇. 基于灵敏度控制的光学薄膜膜系主动设计方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0431002
- 27 Wu Suyong, Long Xingwu, Huang Yun *et al.*. Calculation model for spectral coefficient's first and second order partial derivatives of multilayer optical coatings with respect to layer parameters [J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2010, **22**(1): 83~90  
吴素勇, 龙兴武, 黄 云 等. 膜系光谱系数对膜层参数的一阶和二阶偏导数的计算模型[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(1): 83~90

栏目编辑: 韩 峰