

弱吸收单面薄膜光学特性的表征方法

刘华松¹, 傅 翔², 王利栓¹, 姜玉刚¹, 冷 健¹, 庄克文¹, 季一勤¹

(1. 天津航技术物理研究所 天津市薄膜光学重点实验室, 天津 300192;

2. 二炮驻天津地区军事代表室, 天津 300192)

摘 要: 光谱法是测量光学薄膜光学性能的重要方法之一, 能够直接表征薄膜-基底系统的光学特性, 如: 反射率、透过率和吸收率。通过研究薄膜-基底系统的光传输特性, 推导出在基底具有弱吸收的一般条件下薄膜-基底系统反射率、透射率和吸收率的表达式, 确定了通过测量单面和双面抛光基底及其薄膜特性间接获得薄膜单面光学特性的方法; 在实验中使用 Lambda-900 分光光度计对熔融石英基底的 HfO₂ 薄膜进行了测试, 并通过测量误差分析, 薄膜的单面反射率误差为 1.00%, 单面透过率的误差为 0.601%。研究结果表明文中方法可适用于各类薄膜单面特性的表征与评价。

关键词: 光学特性; 单面反射率; 单面透过率

中图分类号: O484 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2108-07

Characterization of optical properties of weak absorption thin film

Liu Huasong¹, Fu Xuan², Wang Lishuan¹, Jiang Yugang¹, Leng Jian¹, Zhuang Kewen¹, Ji Yiqin¹

(1. Tianjin Key Laboratory of Optical Thin Film, Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300192, China;

2. Military Representative Office of Second Artillery Corps in Tianjin, Tianjin 300192, China)

Abstract: Spectrum method is one of the important testing technique by which the optical properties (reflectance, transmittance and absorptance) of the thin film-substrate system could be obtained directly. The expressions for reflectance, transmittance and absorptance in case of weak absorption existing in substrate were derived by researching the optical transport characteristics of thin film-substrate system. The optical properties of thin film could be calculated by testing the properties of thin films deposited on single sided polishing substrate and double sided polishing substrate indirectly. HfO₂ thin film deposited on fused silica substrate was measured by Lambda-900 spectrophotometer. And the error analysis shows that the error of single side reflectance is 1.00%, however, the error of single side transmittance is about 0.601%. It can be concluded that the characterization and evaluation of various types of single side thin film could be obtained by the method in this paper.

Key words: optical properties; single side reflectance; single side transmittance

收稿日期: 2012-12-21; 修订日期: 2013-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(61235011); 天津市科委项目(12JCNIC01200, 13JCYBJC17300)

作者简介: 刘华松(1980-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事激光薄膜的设计、制备与测试技术研究。Email: liuhuasong@hotmail.com

0 引言

随着光学薄膜设计与制备技术的发展,复杂高精度的薄膜元件已经成为可能并被广泛的应用。理论上,设计的光学薄膜在制备后必须通过光学性能的测试,反过来指导和修正薄膜的设计,也是限制国内外光学薄膜发展的重要因素之一。光学薄膜的重要特性之一就是光学特性,主要包括薄膜的反射率 R 、透射率 T 、吸收率 A 三个主要技术指标,主要采用光谱测试分析系统进行测试^[1-8]。目前商用的光谱仪器如分光光度计、傅里叶变换光谱仪等,能够实现从极紫外到远红外的光谱性能测试^[9]。近年来,先后发展了谐振腔衰荡高反射率测量技术、光热效应的弱吸收测量系统和激光量热测量技术等^[10-12],虽然这些技术的测量精度较高,但无法获得宽谱段的薄膜反射率、吸收率和透射率等。在大部分测量仪器的应用中,得到的是薄膜-基底系统的光学特性,无法直接获得单面薄膜的反射率、透射率和吸收率等特性。因此,如何剥离基底与薄膜的关系,间接测试获得膜层的反射率、透射率和吸收率仍是光学薄膜特性评价的问题之一。

文中基于薄膜-基底的界面光束非相干物理模型推导了薄膜特性的数学表达式,通过数学运算将薄膜单面特性与基底分离开,最后给出了 HfO_2 单层薄膜特性的测试和误差分析,证明该方法具有较小的测量误差,可适用于各类薄膜单面特性表征与评价。

1 基本理论推导

1.1 膜层-基底系统的物理模型

首先,建立薄膜-基底物理光束传输非相干界面的物理模型^[13]。当在基底表面制备薄膜后,多层膜对入射光波强度的调制作用是基于多光束干涉原理,并非简单的光强度叠加,可以将多层膜之间的多个界面与基底之间的界面等效为单一界面,如图 1 所示。从等效界面透射到基底内部的光波经过基底下表面的反射后在基底内部多次反射(反射的次数取决于基底的吸收)。与此同时,光束到达下表面后也会透射出基底,成为透射光束。

根据上述基本原理,在此定义 R_f^+ 为前表面外侧的反射率, T_f^+ 为前表面的正向透射率, A_f^+ 为前表面的

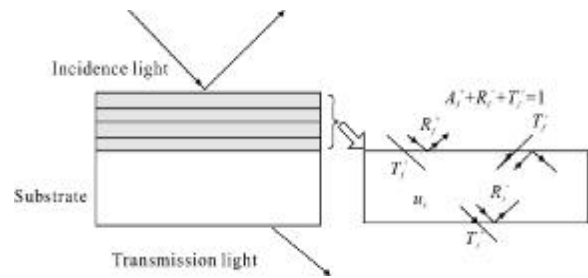


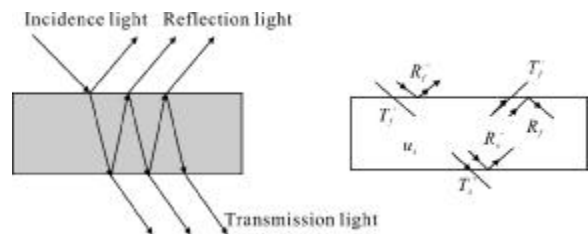
图 1 光学薄膜-基底系统等效界面示意图

Fig.1 Scheme of equivalent interface of the thin film-substrate system

正向吸收率, T_f^- 为前表面的反向透射率, u_s 为基底的内透射率, R_s^- 为后表面内侧反射率, T_s^- 为后表面内侧的透射率。 R_f^+ 、 T_f^+ 和 A_f^+ 分别为薄膜的光学特性-反射率、透射率和吸收率。在此,不考虑基板作为平行平板的干涉效应,所以在基底内部反射到上表面和前表面反射的光只是强度叠加,从基底下表面透过的光也是如此。由于实际测试只能获得整个膜层-基底系统的反射率、透射率和吸收率,需要进一步反演计算得到 R_f^+ 、 T_f^+ 和 A_f^+ 。

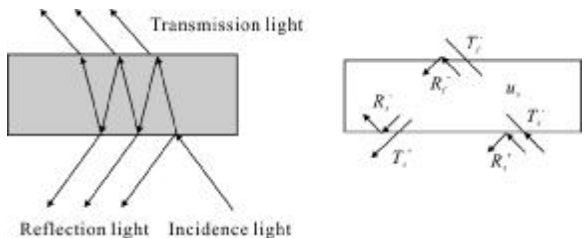
1.2 膜层-基底系统的光学特性

如图 2(a)所示,当光束从膜层方向入射时(定义为正方向),整个膜层-基底系统的反射率和透射率分



(a) 从膜层方向入射到膜层-基底系统

(a) Light incidents from films to thin film-substrate system



(b) 从基底方向入射到膜层-基底系统

(b) Light incidents from substrate to thin film-substrate system

图 2 薄膜-基底系统的反射、透射示意图

Fig.2 Scheme of reflection and transmission of the thin film-substrate system

别为 R_{front} 和 T_{front} 。当光束从基底方向入射时(定义为反方向),则整个膜层-基底系统的反射率为 R_{back} ,透过率为 T_{back} 。无论光从哪个方向入射膜-基系统,光束必然在基底内部多次传播,能量的传递必然与两个表面的内表面反射率和基底的内透过率 u_s 相关。

表 1 和表 2 分别给出了从正方向和反方向入射基底内部不同级次反射和透射光强度的表达式。

表 1 从正方向入射基底内部反射/透射级次的强度

Tab.1 Intensity of reflection/transmission with different orders in substrate when light incidents from forward direction

Orders	Intensity of front surface reflection	Intensity of rear surface transmission
1	R_f^+	$T_f^+ u_s T_s^+$
2	$T_f^+ u_s R_s^- u_s T_f^-$	$T_f^+ u_s (R_s^- u_s R_f^- u_s) T_s^+$
3	$T_f^+ u_s R_s^- u_s (R_f^- u_s R_s^- u_s) T_f^-$	$T_f^+ u_s (R_s^- u_s R_f^- u_s) T_s^+$
4	$T_f^+ u_s R_s^- u_s (R_f^- u_s R_s^- u_s) T_f^-$	$T_f^+ u_s (R_s^- u_s R_f^- u_s) T_s^+$
5

表 2 从反方向入射基底内部反射/透射级次的强度

Tab.2 Intensity of reflection/transmission with different orders in substrate when light incidents from backward direction

Orders	Intensity of front surface reflection	Intensity of rear surface transmission
1	R_s^+	$T_s^- u_s T_f^-$
2	$T_s^- u_s R_f^- u_s T_s^+$	$T_s^- u_s (R_f^- u_s R_s^- u_s) T_s^+$
3	$T_s^- u_s R_f^- u_s (R_s^- u_s R_f^- u_s) T_s^+$	$T_s^- u_s (R_f^- u_s R_s^- u_s) T_s^+$
4	$T_s^- u_s R_f^- u_s (R_s^- u_s R_f^- u_s) T_s^+$	$T_s^- u_s (R_f^- u_s R_s^- u_s) T_s^+$
5

因此,将多次反射/透射进行强度叠加,根据等比级数的前 n 项和公式与膜系透射定理($T_f^+ = T_f^-$, $T_s^+ = T_s^-$, $R_s^+ = R_s^-$),得到从膜层方向入射到膜层-基底系统的反射率和透射率分别为:

$$R_{front} = R_f^+ + \frac{(T_f^+)^2 R_s^+ + (u_s)^2}{1 - (R_f^+ R_s^+ u_s^2)} \quad (1)$$

$$T_{front} = \frac{T_f^+ T_s^+ u_s}{1 - (R_f^+ R_s^+ u_s^2)} \quad (2)$$

从基底方向入射到膜层-基底系统的反射率和

透射率分别为:

$$R_{back} = R_s^+ + \frac{(T_s^+)^2 R_f^- (u_s)^2}{1 - (R_s^+ R_f^- u_s^2)} \quad (3)$$

$$T_{back} = \frac{T_f^+ T_s^+ u_s}{1 - (R_s^+ R_f^- u_s^2)} \quad (4)$$

基底的光谱特性可以用上述方法获得,双面反射率 R_s 、双面透过率 T 和内透过率 u_s 分别为:

$$R_s = R_s^{front} = R_s^{back} + R_s^+ + \frac{(T_s^+)^2 R_s^+ (u_s)^2}{1 - (R_s^+ R_s^+ u_s^2)} \quad (5)$$

$$T_s = T_s^{front} = T_s^{back} = \frac{(T_s^+)^2 u_s}{1 - (R_s^+ R_s^+ u_s^2)} \quad (6)$$

$$u_s = \frac{R_s - R_s^+}{T_s R_s^+} \quad (7)$$

1.3 薄膜光学特性计算

1.2 节给出了膜层-基底系统的光学特性表达式,也就是说可以通过测试方法获得的 R_{front} 、 T_{front} 、 R_{back} 和 T_{back} ,下面推导单面薄膜的光学特性 R_f^+ 、 T_f^+ 和 A_f^+ 。

将公式(1)除以公式(2):

$$\frac{R_{front} - R_f^+}{T_{front}} = \left(\frac{T_f^+ R_s^+}{T_s^+} \right) u_s \quad (8)$$

将公式(3)除以公式(4):

$$\frac{R_{back} - R_f^+}{T_{front}} = \left(\frac{T_f^+ R_s^+}{T_s^+} \right) u_s \quad (9)$$

将公式(3)的两边变换得到:

$$R_f^- = \frac{(R_{back} - R_s^+)}{[(R_{back} - R_s^+) (R_s^+) + (T_s^+)^2]} u_s^2 \quad (10)$$

将公式(10)带入公式(9),得到单面透过率 T_f^+ :

$$T_f^+ = \frac{T_{front} T_s^+}{[(R_{back} - R_s^+) (R_s^+) + (T_s^+)^2]} u_s \quad (11)$$

将公式(11)带入公式(8),得到单面反射率 R_f^+ :

$$R_f^+ = R_{front} - \frac{R_s^+ T_{front} T_{front}}{[(R_{back} - R_s^+) (R_s^+) + (T_s^+)^2]} \quad (12)$$

则膜层的吸收为 T_f^+ :

$$A_f^+ = 1 - R_f^+ - T_f^+ \quad (13)$$

综上所述,薄膜的透过率、反射率和吸收率可以

通过两种方法计算,具体如下。

第一种方法:需要在—块双面抛光的样品上即可实现。这种情况下只采用图 2(a)所示的入射方向,测量得到前表面的双面反射率 R_{front} ;采用图 2(b)所示的入射方向,测试得到后表面的双面反射率 R_{back} ,两种测试方式必须采用相同的入射角度,根据公式(11)~(13)计算得到薄膜的特性。

第二种方法:必须要有两块样品实现,一块双面抛光镀膜,一块单面抛光镀膜。通过测量单面反射率,利用公式(8)直接获得单面透过率,而吸收率则由公式(13)计算得到。

2 单层膜的光谱特性与误差分析

2.1 HfO₂ 薄膜样品光谱测量

利用 Lambda-900 分光光度计算对熔融石英基底的 HfO₂ 薄膜进行测试。首先测量基底的双面透过率、双面反射率和单面反射率,如图 3 所示。在双面抛光的熔融石英基底上制备单面 HfO₂ 单层膜,测试得到的双面透过率、前表面入射和后表面入射的反射率如图 4 所示。

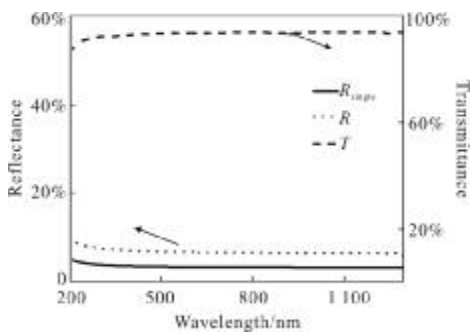


图 3 熔融石英基底光学特性
Fig.3 Optical properties of fused silica

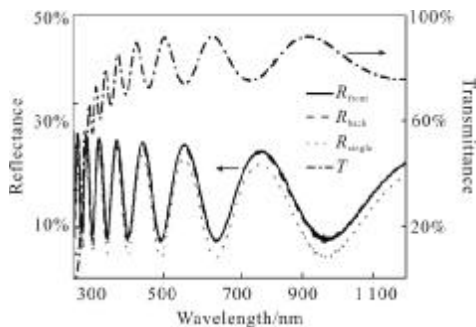


图 4 HfO₂ 薄膜的光学特性
Fig.4 Optical properties of HfO₂ thin film

2.2 单面光谱测量误差分析

1.3 节给出了计算薄膜光学特性的两种方法,各有优缺点,这种间接表征薄膜性能必然存在测试误差,重要的是如何能够获得误差小的光学性能数据。下面分析两种不同情况测试过程的误差传递特性,假设基底无吸收 $u_s=1$,并针对单层膜进行分析。

2.2.1 第一种方法

由于系统误差在间接测量中可能会被修正,考虑误差的代数传递关系,从公式(11)推导出单面透过率的误差传递系数如下:

$$\Delta T_f^+ = \left| \frac{\partial T_f^+}{\partial T_f} \right| \Delta T_{front} + \left| \frac{\partial T_f^+}{\partial R_{back}^+} \right| \Delta R_{back} + \left| \frac{\partial T_f^+}{\partial R_s^+} \right| \Delta R_s^+ = \left| \frac{1-R_s^+}{R_{back}^+ R_s^+ - 2R_s^+ + 1} \right| \Delta T_{front} + \left| \frac{R_s^+}{(R_{back}^+ R_s^+ - 2R_s^+ + 1)^2} \right| \Delta R_{back} + \left| \frac{\partial T_f^+}{\partial R_s^+} \right| \Delta R_s^+ \quad (14)$$

由公式(12)推导单面反射率的误差传递公式:

$$\Delta R_f^+ = \left| \frac{\partial R_f^+}{\partial R_{front}^+} \right| \Delta R_{front} + \left| \frac{\partial R_f^+}{\partial T_f} \right| \Delta T_f + \left| \frac{\partial R_f^+}{\partial T_f^+} \right| \Delta T_f^+ = \Delta R_{front} + \left| \frac{T_f^+ R_s^+}{1-R_s^+} \right| \Delta T_f + \left| \frac{T_f R_s^+}{1-R_s^+} \right| \Delta T_f^+ \quad (15)$$

公式(11)中的第三项可以采用标准的基底数据,也就是通过其他高精度标定方法,误差可在 $1e^{-5}$ 量级,因此忽略此项的影响。定义误差传递系数如下:

$$f_1^T = \left| \frac{1-R_s^+}{R_{back}^+ R_s^+ - 2R_s^+ + 1} \right| \quad (16)$$

$$f_2^T = \left| \frac{1-R_s^+}{(R_{back}^+ R_s^+ - 2R_s^+ + 1)^2} \right| \quad (17)$$

$$f_2^R = \left| \left(\frac{T_f^+ R_s^+}{1-R_s^+} \right) (1+f_1^T) \right| \quad (18)$$

$$f_3^R = \left| \left(\frac{T_f R_s^+}{1-R_s^+} \right) f_2^T \right| \quad (19)$$

则单面透过率误差表达为:

$$\Delta T_f^+ = f_1^T \Delta T_f + f_2^T \Delta R_{back} \quad (20)$$

$$\Delta R_f^+ = \Delta R_{\text{front}} + f_2^R \Delta T_f + f_3^R \Delta R_{\text{back}} \quad (21)$$

对于第 2 节中的 HfO₂ 单层膜的光谱特性,利用公式(16)~(19)计算单面透过率和反射率的误差传递系数,分别如图 5 和图 6 所示。在透射率误差传递系数中,公式(20)的第一项误差传递系数大于第二项误差传递系数近两个数量级,说明 ΔT_f 的测试误差决定了薄膜的单面透过率;在透射率误差传递系数中,公式(20)的第一项误差传递系数大于第二项误差传递系数近两个数量级,说明 ΔT_f 的测试误差决定了薄膜的单面透过率的误差;在反射率误差传递系数中,公式(21)的误差传递系数共三项,其中第一项误差传递系数为 f_1^R ,第二项和第三项的误差传递系数小于 0.1,说明第一项误差决定了反射率的测试误差,即由前表面入射反射率的测量误差 ΔR_{front} 所决定。

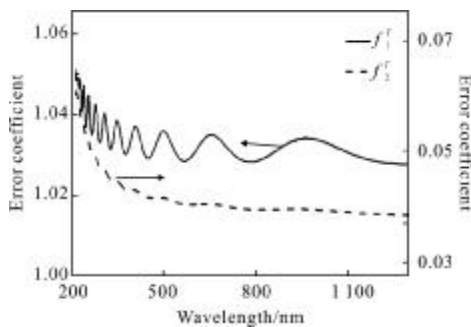


图 5 HfO₂ 薄膜单面透过率光谱误差传递系数
Fig.5 Error transfer function of single side transmittance of HfO₂ thin film

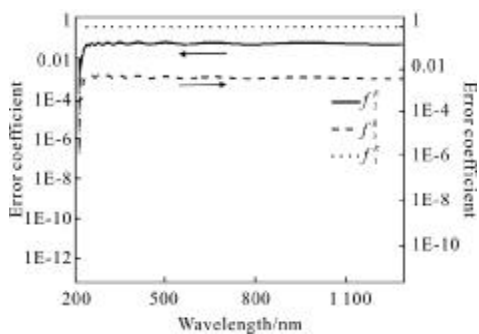


图 6 HfO₂ 薄膜单面反射率光谱误差传递系数
Fig.6 Error transfer function of single side reflectance of HfO₂ thin film

2.2.2 第二种方法

实验中可采用单面抛光的基底直接获得单面反

射率,反射率的误差传递系数为 1,说明误差直接由反射率测量误差决定。根据公式(16)变换得到单面透过率的表达式:

$$T_f^+ = \left(\frac{R_{\text{front}} - R_f^+}{T_f} \right) \left(\frac{1 - R_s^+}{R_s^+} \right) \quad (22)$$

仍忽略基底单面反射率的误差项,则单面透过率表征的误差传递公式为:

$$\Delta T_f^+ = \left| \frac{\partial T_f^+}{\partial R_{\text{front}}} \right| \Delta R_{\text{front}} + \left| \frac{\partial T_f^+}{\partial R_{\text{back}}} \right| \Delta R_{\text{back}} + \left| \frac{\partial T_f^+}{\partial R_f^+} \right| \Delta T_f = \left| \frac{\partial T_f^+}{\partial R_s^+} \right| \Delta R_s^+ = \left| \left(\frac{1 - R_s^+}{T_f R_s^+} \right) \right| (\Delta R_{\text{front}} - \Delta R_f^+) + \left| \left(\frac{R_s^+ - 1}{R_s^+} \right) \left(\frac{R_{\text{front}} - R_f^+}{T_f^2} \right) \right| \Delta T_f \quad (23)$$

在单面透过率的误差中,当前表面反射率的测试误差和单面反射率测试误差接近时,第一项和第二项的反射率测试误差可以被消除。图 7 给出了第三项误差传递系数的计算结果。值得说明的是:当膜层折射率大于基底折射率时,整个光谱内的透射率误差传递系数均大于第一种方法,说明透射率的测试误差决定了单面透射率的测试误差,并且对透射率极大值的影响最小,对极大值影响最大,因此第二种测试方法对判断透射率的极大值具有较好的效果。

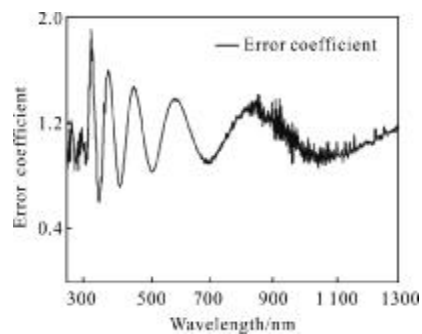


图 7 HfO₂ 薄膜单面反射率光谱误差传递系数
Fig.7 Error transfer function of single side reflectance of HfO₂ thin film

2.2.3 绝对误差计算

一般情况下, Lambda-900 分光光度计的透射率测量误差为 0.50%,反射率测量误差为 1.00%。计算得到两种方法下薄膜光学特性的误差如图 8 和图 9 所示。在第一种方法下,单面透射率误差最大值为

0.601%, 最小值为 0.546%; 单面反射率误差最大值为 1.04%, 最小值为 1.00%。在第二种方法下, 单面透射率误差最大值为 1.75%, 最小值为 0.06%; 单面反射率误差与测试误差相同, 为 1.00%。

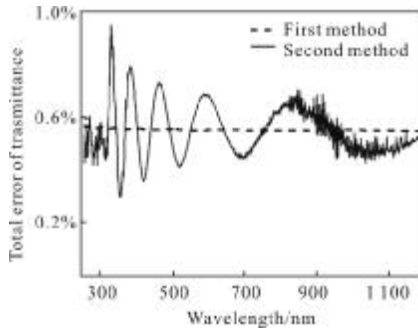


图 8 HfO₂ 单层膜单面透射率光谱总误差

Fig.8 Total error of single side transmittance of HfO₂ thin film

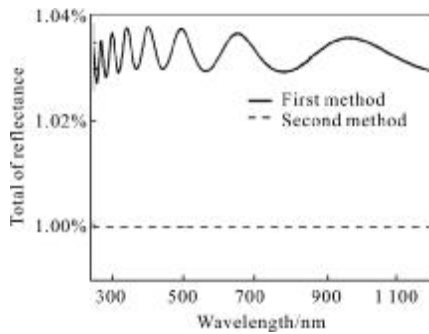


图 9 HfO₂ 单层膜单面反射率光谱总误差

Fig.9 Total error of single side reflectance of HfO₂ thin film

将图 1 和图 2 中的光谱数据带入公式(15)~(17)中计算, 得到单层 HfO₂ 薄膜的反射率、透射率和吸收率, 如图 10~图 12 所示。从图中可以看出该薄膜在短波处有较大的吸收, 呈干涉振荡增加趋势, 反映了薄膜的真实吸收光谱特征。

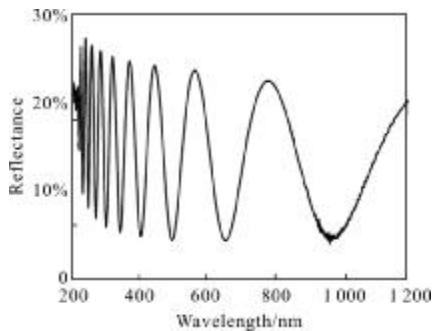


图 10 HfO₂ 薄膜单面反射率

Fig.10 Single side reflectance of HfO₂ thin film

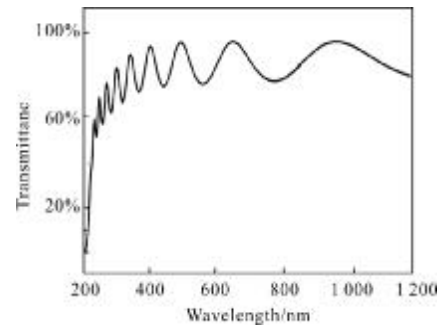


图 11 HfO₂ 薄膜单面透射率

Fig.11 Single side transmittance of HfO₂ thin film

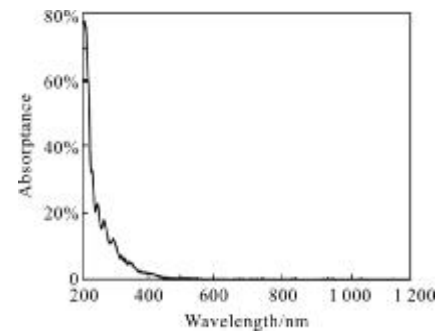


图 12 HfO₂ 薄膜单面吸收率

Fig.12 Single side absorbance of HfO₂ thin film

3 结 论

薄膜-基底系统的光学特性可以通过选择合理的测试方法直接获得, 而单面薄膜的反射率、透射率和吸收率等特性则必须通过数学反演计算的方法剥离基底与薄膜的关系间接得到。研究结果表明, 使用文中的两种方法均可实现弱吸收薄膜单面光学特性的表征; 但从误差传递角度分析, 薄膜的单面反射率特性最好采用直接测试方法获得, 此时其误差直接由仪器的测量误差决定, 而薄膜单面透射率则最好选用第一种方法, 此时误差最大值为 0.601%, 最小值为 0.546%。因此, 可以采用两种方法组合进行薄膜单面特性的表征, 从而得到误差最小的测试结果。

参 考 文 献:

[1] Tang Jinfu, Gu Peifu, Liu Xu, et al. Modern Optical Thin Film Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)
唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.

[2] Fleig C, Giesen A. High precision reflectometer [C]//

- Proceedings of the 5th International Workshop of Laser Beam and optics Characterization VDI-Verlag, 2000: 319-332.
- [3] Wu P Y. Spectrophotometer for measuring spectral reflectance and transmittance[J]. *Appl Opt*, 1975, 33(10): 131.
- [4] Voss A, Plass W, Giesen A. A simple high precision method of measuring the specular reflectance of optical components[J]. *Appl Opt*, 1994, 34: 7239-7253.
- [5] Philippe V V, Sebastien P, Herve P, et al. High-precision measurements of reflectance [C]//SPIE, 2006, 6342: 63421Z.
- [6] Huang Zuxin, Zhao Jianlin, Hu Xiaoyang, et al. Parameters optimized for optical thin film weak absorption testing set-up[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1779-1783. (in Chinese)
黄祖鑫, 赵建林, 胡晓阳, 等. 光学薄膜弱吸收测试装置参数优化[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(9): 1779-1783.
- [7] Ji Yiqin, Liu Huasong, Wang Zhanshan, et al. Influence of interface layer on antireflection coating for laser optics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 2003-2008. (in Chinese)
季一勤, 刘华松, 王占山, 等. 界面层对激光减反膜的影响研究[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 2003-2008.
- [8] Ji Yiqin, Jiang Yugang, Liu Huasong, et al. Analysis on effects of thermal treatment on structural characteristic of ion beam sputtering SiO₂ films [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 418-422. (in Chinese)
季一勤, 姜玉刚, 刘华松, 等. 热处理对离子束溅射 SiO₂ 薄膜结构特性的影响分析 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2): 418-422.
- [9] Liu Huasong, Liu Dandan, Ji Yiqin. Optimizing operating parameters of spectrophotometer for testing transmission spectrum of optical substrate [C]//SPIE, 2010, 7656: 765604-1.
- [10] Rempe G, Thompson R J. Measurement of ultralow losses in an optical interferometer[J]. *Opt Lett*, 1992, 17(5): 363-365.
- [11] Huang Zuxin, Zhao Jianlin, Hu Xiaoyang, et al. Parameters optimized for optical thin film weak absorption testing set-up [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (9): 1779 - 1783. (in Chinese)
黄祖鑫, 赵建林, 胡晓阳, 等. 光学薄膜弱吸收测试装置参数优化[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(9): 1779-1783.
- [12] Wu Z L, Thomsen M, Kuo P K, et al. Photo thermal characterization of optical thin film coatings [J]. *Opt Eng*, 1997, 36 (1): 251.
- [13] Lin Yongchang, Lu Weiqiang. Principle of Optical Thin Films [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990. (in Chinese)
林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.