文章编号: 1672-8785(2011)07-0009-08

一种适用于在线检测的纳米薄膜厚度 精确测量方法

姬弘桢 邹娟娟 崔宝双

(中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083)

摘 要:提出了一种新的薄膜厚度测量方法。该方法以镀有一层厚度足以引起干涉的过 渡层为衬底,通过测量镀膜前后透(反)射谱的变化,即可实现薄膜厚度的精确测量。 由于过渡层的厚度已经引起干涉,新镀上去的待测薄膜即使很薄,也会引起干涉的变 化。通过镀制待测薄膜前后透(反)射谱干涉的变化,可以很容易地精确测量出待测薄 膜的厚度,其测量极限高达1nm以上。该方法既保持了传统光谱法的所有优势,又可 以精确测量纳米超薄膜的厚度。它非常简单、快捷,特别适用于镀膜行业的在线检测 和实时监控,尤其是弱吸收材料超薄膜的厚度测量。

关键词:薄膜;厚度;测量;精确

中图分类号: O484 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.07.002

An On-line Accurate Measurement Method for Nano Film Thickness

JI Hong-zhen, ZOU Juan-juan, CUI Bao-shuang

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

Abstract: A novel thin film thickness measurement method is proposed. In the method, a transition layer which is thick enough for interference is used as a substrate. So, the thickness of the deposited layer can be accurately measured by measuring the shift of an interference peak before and after deposition. Because the thickness of the transition layer has already induced interference, the interference can be changed even if the newly deposited layer is very thin. According to the change of the interference in transmittance or reflectance spectra, the thickness of the layer can be determined accurately and easily with a measurement limit of 1 nm at least. This method is simple and fast in operation. It is very suitable for the on-line detection and real-time monitoring in coating industries, particularly for the thickness measurement of weak absorption ultra-thin films.

Key words: thin film; thickness; determination; precise

0 引言

自20世纪70年代以来,薄膜技术和薄膜材

料得到了迅速发展,已成为当代真空技术和材 料科学中最活跃的研究领域。由于跨学科的综 合设计与高精尖的制造技术已使得薄膜技术渗

收稿日期: 2011–05–25

基金项目:国家自然科学基金(10874196、 60508018);上海市青年科技启明星跟踪计划(08QH14025);上海市研 发基地协作能力建设专项(09DZ2202200、 08DZ2201000)

作者简介: 姬弘桢 (1987-),男,山东聊城人,硕士研究生,主要从事光子晶体和薄膜技术研究。 E-mail: 362675476@qq.com

http://journal.sitp.ac.cn/hw

INFRARED (MONTHLY)/VOL.32, NO.7, JUL 2011

透到信息、生物、航空、航天和新能源等前沿领 域,薄膜技术在从航天、卫星等空间探测器到集 成电路、生物芯片、激光器件、液晶显示以及集 成光学等方面都发挥着重要作用^[1-3]。

薄膜的光学常数(折射率 n 和消光系数 k) 和厚度是决定其性质和控制性能的基本参数。 随着各个应用领域的迅速发展,薄膜的质量越 来越高,厚度也越来越薄。而薄膜厚度的精确测 量与监控,对于光学器件的设计和功能实现却至 关重要。因此,对薄膜(尤其是纳米超薄膜)厚度 进行精确测量和实时监控一直是业内所期待并 为之努力的方向之一。

薄膜厚度的测量方法有很多。其中,非光学 测量方法包括电阻法、电容法、电磁法、涡流法、 称量法、超声波法、α粒子法和探针法^[4]等。 探针法是一种较为常用的方法,它通过一个高 精度机械触针在物体表面上进行运动来感知表 面轮廓的变化。台阶仪就是这种方法的应用实 例。作为一种基于机械运动的探针测量设备,台 阶仪的精度受到许多因素的限制,而且其在测 量薄膜厚度时,需要露出薄膜基底作为阶梯。因 此,往往需要对薄膜进行二次加工。在测量时, 探针在薄膜表面上的移动也会给薄膜造成一定 的损害。此外,机械与电学测量方法基本上是接 触式测量,普遍存在测量范围窄、通用性差和需 要对测试样品作特殊处理等问题。因此,这些方 法并不适合在线监测。

相对机械法和电学法而言,光学法具有速 度快、精度高和非接触无损测量等优点,逐步成 为主流的薄膜检测手段。其中最有代表性的是 椭圆偏振法^[5-6]。椭圆偏振法是一种用于研究 两媒质界面或薄膜中发生的现象及其特性的光 学方法。其基本思路是,起偏器产生的线偏振光 经具有一定取向的 1/4 波片后变成特殊的椭圆 偏振光,然后被投射到待测样品表面。此时,只 要起偏器取适当的透光方向,被测样品表面就 会反射出线偏振光。根据偏振光在反射前后的 偏振状态变化(包括振幅和相位的变化),便可 以确定薄膜参数。椭偏法具有非破坏性、非扰动 性等优点,而且灵敏度和精度都比较高。然而, 其设备复杂,实验数据的计算处理过程繁琐冗 长,测量结果与操作者的经验有很大关系,并且 不能对各向异性介质进行准确测量,因此难以 做到实时监控。

现在普遍采用的在线检测方法是全光谱拟 合法和极值法 [7-9]。全光谱拟合法首先通过测 量待测薄膜在宽光谱范围内的透射率或反射率 曲线, 然后用计算机进行计算或迭代拟合, 最后 得到薄膜的厚度及其在此波段内的光学常数。 但是这种方法纯粹是通过拟合的方式来获取薄 膜的厚度信息的,对于 20 nm 以内薄膜的拟合误 差很大, 尤其是当待测薄膜的折射率与基片的 相接近时。极值法则利用了多光束干涉中在光 学膜厚 nd 为 $\lambda/4$ 的整数倍时出现的干涉极大值 或极小值。利用薄膜的透射或反射率曲线上的 2个或2个以上的极值点的位置,即可计算出薄 膜的厚度和光学常数。该方法计算简单, 但是薄 膜必须具有足够的厚度才能在光谱曲线中存在 足够多的极大值或极小值点,所以极值法不能 用于测量超薄薄膜, 它一般要求薄膜的厚度在 200 nm 以上。

以上两种方法虽然设备简单、测量便捷以 及适合于在线检测和实时监控,但精确度都不 高,无法用于类似于纳米超薄膜的测量。本文通 过引入一层可形成干涉的过渡层薄膜,并在此 基础上镀制待测薄膜,然后通过镀膜前后的干 涉峰位的偏移,即可巧妙地实现对超薄薄膜的 精确测量。该方法与传统的全光谱拟合法、极值 法和包络法等相结合后,不仅可以对各种厚度 的薄膜进行精确测量,而且其设备简单、测量便 捷,特别适合于在线检测和实时监控。这样既保 持了传统方法的所有优点,同时又能实现对超 薄薄膜的精确测量,这对于超薄薄膜的精确锁 制是非常有利的。

1 基本原理

1.1 模型

薄膜的光学厚度 nd 是由透射 / 反射光谱极 值点处的波长决定的,因此峰位包含了光学参

INFRARED (MONTHLY)/VOL.32, NO.7, JUL 2011





图 1 传统方法与本文方法的原理示意图

图 2(a) 所示为直接将待测薄膜镀制在基底 上的传统方法 (直接将 Nb₂O₅ 镀制在载玻片上) 的结果。其中, 10 nm 薄膜与基底之间透射率 最大只有近似 2% 的强度变化。图 2(b) 所示为以 载玻片为基底, 以 150 nm 厚度的 Si₃N₄ 为过渡 层时, 0 nm、1 nm、5 nm 和 10 nm 厚度的待 测 Nb₂O₅ 薄膜所对应的透射光谱。其中, 0 nm 谱线为未镀待测 Nb2O5 薄膜时 Si3N4 过渡层和 载玻片基底所形成的透射光谱。由于过渡层已 经形成干涉峰(图 2(b) 中 0 nm 对应的光谱), 镀 上待测薄膜后,峰位将会横向偏移。与直接将待 测薄膜镀制在基底上的传统方法相比,本文方法 中不同厚度 Nb₂O₅ 之间的透射光谱的对比更加 明显, 10 nm 与 0 nm 之间的峰位偏移已经达到 7.6% (0 nm 对应的波峰为 600 nm, 10 nm 对应的 波峰为 645.6 nm), 明显大于图 2(a) 中 10 nm 薄 膜与基底之间透射率最大只有近似2%的强度变 化。由于峰位携带了大量与材料的光学常数和 厚度等相关的重要信息,而且它不会轻易受到 测试系统的影响,可以得到准确测量,其变化可 以很好地反映出材料的光学常数和厚度信息。 而强度虽然也与材料的光学常数和厚度有关, 但较易受到测试系统的影响和干扰(比如光源的



图 2 在玻璃衬底上镀制不同厚度 Nb₂O₅ 后形成的透射光谱

INFRARED (MONTHLY)/VOL.32, NO.7, JUL 2011

http://journal.sitp.ac.cn/hw

稳定性等),难以得到准确测量。因此,本文方法 中的峰位变化幅度明显大于传统方法中的强度 变化幅度,这正是本文方法可以极大提高超薄 薄膜厚度检测精度的主要依据。通过将本文方 法与传统的全光谱拟合法、极值法和包络法相 结合,可以对超薄薄膜的厚度进行精确测量。

1.2 过渡层的厚度选择

前面提到通过引入足以引起干涉的过渡层 即可大幅提高纳米超薄薄膜厚度的测量精度, 那么究竟应该选择什么材料作为过渡层?什么 厚度才是最佳的选择呢?下面针对这些问题分 别进行分析。为了分析过渡层厚度对峰位偏移 的影响,首先选择分别能够产生一级、二级、三 级干涉的过渡层厚度,然后再考察添加上相同厚 度的待测薄膜后所引起的干涉峰偏移的情况。

经软件模拟后发现,当 Si₃N₄ 的厚度为 150 nm、 220 nm 和 360 nm 时, 分别会出现一级、 二级和三级干涉峰。以载玻片为基底,将其折射 率设为1.52; Si₃N₄的厚度分别为150 nm、220 nm 和 360 nm,将其折射率设为 2.0。然后在干 涉的基础上再添加上 1 nm 、 5 nm 、 10 nm 和 20nm 厚度的 TiO_x 薄膜。观察峰位的偏移, 并计 算出对应的峰位相对偏移 δ :

$$\delta = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中, λ_{0} 为仅有一层过渡层时的干涉峰所对应 的波长, λ 为镀上待测薄膜后同一级干涉峰所 对应的波长。图 3 所示为计算结果。其中, 横坐 标表示待测薄膜的厚度, 纵坐标表示峰位的相对 偏移。

从图3中可以看出,当过渡层膜厚达到一级 干涉时,峰位的相对偏移最大。随着干涉级次的 增加,峰位的相对偏移逐渐减小。因此,在选择 过渡层的厚度时,应使其只能产生一级干涉。此 时通过增加单位待测材料的厚度,可以获得最大 的峰位偏移, 使厚度引起的变化变得最明显。

1.3 过渡层的折射率选择

为了方便起见,我们把待测薄膜材料的折射 率设为固定值,并且不考虑色散和吸收。以载玻 INFRARED (MONTHLY)/VOL.32, NO.7, JUL 2011

片为基底 (折射率设为 1.52),将过渡层的厚度设 置为160 nm,其折射率分别为1.6、1.8、2.0、 2.2 和 2.4,此时均为一级干涉。待测薄膜的折射 率定为2.0,其厚度分别为1nm、2nm、5nm、 10 nm 和 20 nm。通过软件计算得到相应的透射 光谱, 然后根据式 (1) 得到峰位的相对偏移 (见表 1)。图4所示为计算结果。其中,横坐标为待测 薄膜的厚度,纵坐标为峰位的相对偏移(%)。



图 3 当过渡层 (Si₃N₄ 材料, 折射率为 2.0) 的厚 度分别为 150 nm、220 nm 和 360nm 时,干涉峰 位的相对偏移量随待测薄膜 (TiOx 材料, 折射 率为 2.3) 厚度的变化情况 (衬底为玻璃, n=1.52)

表1 峰位相对偏移与过渡层折射率的关系

	折射率									
厚度 /nm	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4					
1	1.23	0.85	0.63	0.48	0.39					
2	2.54	1.68	1.25	0.97	0.78					
5	6.8	4.24	3.13	2.44	1.95					
10	14.69	8.54	6.25	4.86	3.91					
20	32.23	17.12	12.5	9.72	7.84					

从图 4 中可以看出, 当待测薄膜的折射率 和厚度为一定值时,过渡层的折射率越小,峰位 的相对偏移越明显。

2 理论模拟与分析

2.1 全光谱拟合法

在正入射条件下,薄膜的透射率 T 是一个 关于 n_0 (空气)、 n_s (基底)、n (膜层)、d和 λ

2011 年7月

的函数,即 $T = T(n_0, n_s, n, d, \lambda)$ 。若在 n_0 、 n_s 、 λ 一定的情况下,透射率只是n和d的函数,即 T = T(n,d)。在已知薄膜的厚度d和光学常数n的情况下,可以计算出与各个波长相对应的透 射率。反之,若要求解薄膜的厚度和光学常数, 则可通过透射率反演得到。理论上,待求的未知 数只有n和d两个,只需两个方程即可求解。但 在实际应用中,由于薄膜材料存在不同程度的 色散和吸收,n不是一个固定值,而是一个会 随波长变化的值 ($n = n(\lambda)$)。现在面临的最大困 难是,薄膜的各个参数很难用所测光学量的代 数式来表示,所建立的方程组也是非线性的。

为了求解出薄膜的厚度和光学常数,全光谱拟 合法利用透射率曲线 $T(n,d,\lambda)$ 反演得到待求解 的 $n \ n \ d$ (也可使用反射率曲线)。首先给欲求解 的参数 (n,d) 设定初始值,得到相应的透射光谱 $T(n,d,\lambda)$ 。由于初始值不一定是真实值,获得的 理论透射光谱 $T(n,d,\lambda)$ 和实际测得的反射光谱 $T_0(n,d,\lambda)$ 之间会存在一定偏差。通过计算机优 化计算,不断改变欲求解的参数值,使理论反射 光谱 $T(n,d,\lambda)$ 与实际值 $T_0(n,d,\lambda)$ 之间的偏差达 到最小值。此时的参数值可以认为是待求解的 薄膜参数,利用透射率曲线的全光谱拟合法正 是基于此实现的 ^[9]。



图 4 当过渡层的厚度为 160 nm、折射率分别为 1.6、1.8、2.0、2.2 和 2.4 时,干涉峰位的相 对偏移量随待测薄膜(折射率为 2.0)厚度的变化 情况(衬底为玻璃, n=1.52)

http://journal.sitp.ac.cn/hw

2.2 理论模拟方法

为了研究本文方法所能达到的测量极限和 精度,我们在已知厚度的理论计算光谱的基础 上引入与实验水平相当的噪声,然后通过用软 件拟合该模拟实验光谱获取了其厚度值,从而 模拟出实际的实验情况和误差水平。噪声可以 参考实际实验过程中的信噪比并用 Matlab 编程 得到,这里添加了高斯白噪声。信噪比为 250: 1。

假定已知待测薄膜的折射率,将本文方法和 传统方法对于膜厚测量的极限厚度进行对比。 2.2.1 对比组(传统方法)

(1) 依次建立基底层和待测膜层,设定各膜层的折射率和待测薄膜的厚度 h,并将此厚度 h 作为薄膜的实际厚度值;

(2) 通过软件计算得到理论透射光谱 T;

(3) 通过给理论透射光谱 T 加上噪声来模拟 实际的实验光谱,并将得到的新透射光谱 T' 作 为实测实验数据导入软件;

(4) 通过将膜厚作为拟合参数进行拟合,得到待测薄膜的拟合厚度 h';

(5) 设定不同的 h 值,得到相应的测量厚度h'。当厚度的测量误差大于 10% 时,即

$$\Delta = \frac{|h' - h|}{h} \times 100\% \ge 10\%$$
 (2)

认为该方法已经失效。此时的厚度即为待测薄膜的极限厚度 h_e。

2.2.2 实验组(本文方法)

在对比组的步骤 (1) 中添加过渡层, 并设定 其折射率和厚度。待测薄膜的实际厚度值 h 同 对比组, 其他过程也同对比组。

将用本文方法和传统方法测得的极限厚度 h_e 进行对比。改变待测薄膜的折射率,使其分 别大于 (TiO_x)、等于 (Si₃N₄)、小于 (SiO₂) 过渡 层的折射率。然后分析相应的极限厚度 h_e 的变 化及其规律。

2.3 理论模拟结果与讨论

2.3.1 待测薄膜折射率大于过渡层折射率的情况

对以载玻片为基底、 150 nm Si₃N₄ 为过渡 层、 TiO_x 为待测薄膜的情况进行模拟。根据文

INFRARED (MONTHLY)/VOL.32, NO.7, JUL 2011

(1) 透射光谱

图 5 所示为 TiO_x 分别为 0 nm 、 1 nm 、 2



图 5(a) 所示为直接将 TiO_x 镀在载玻片基 底上的透射光谱。其中, 横坐标为波长 (单位: nm),波长范围为400~1000 nm;纵坐标为透射 率。不同的透射率曲线对应于不同厚度的 TiO_x。

图 5(b) 所示为将 TiO_x 薄膜镀在 150 nm Si₃N₄ 过渡层上的透射光谱。其坐标设定同图 5(a)。

(2) 拟合结果

表2 当待测薄膜折射率大于过渡层折射率时, 用传统方法检测的厚度极限情况 (单位: nm)

实际厚度 h	3	2	1.7	1.5	1	0.5	0.1
拟合厚度 h'	3.1	2.1	1.9	1.7	1.3	0.9	0.8
误差 /%	3.3	5.0	11.8	13.3	30.0	80.0	700.0

表3 当待测薄膜折射率大于过渡层折射率时, 用本文方法检测的厚度极限情况 (单位: nm)

实际厚度 h	3	2	1.7	1.5	1	0.5	0.1
拟合厚度 h'	3.0	2.0	1.7	1.5	1.0	0.5	0.1
误差 /%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

从表 2 和表 3 中可以看出, 传统方法的拟 合结果普遍比实际厚度偏大,测量的极限厚度

INFRARED (MONTHLY)/VOL.32, NO.7, JUL 2011

nm、5 nm 和 10 nm 时的理论透射光谱。其中,图 5(a) 所示为传统方法获得的透射光谱,图 5(b) 所 示为本文方法获得的透射光谱。 0 nm 谱线对应 于基片或过渡层上未镀待测薄膜时的透射光谱。



图 5 透射光谱(基底:n=1.52, Si₃N₄:n=2.0, TiO_x:n=2.3)

为 $h_{eA} \approx 1.7$ nm。当待测薄膜的厚度为 0.1 nm 时,用本文方法依然能准确测出,故其极限厚度 $h_{eB} = 0.1 \text{ nm}$.

2.3.2 待测薄膜折射率等于过渡层折射率的情 况

此时将待测薄膜换成与过渡层材料完全相 同的 Si₃N₄,其折射率为 2.0。

(1) 透射光谱

图 6(a) 所示为直接将 Si₃N₄ 薄膜镀在载玻 片基底上后测得的透射光谱。各条曲线对应于 不同厚度的 Si₃N₄ 薄膜。其他设置同图 5。

图 6(b) 所示为将待测 Si₃N₄ 薄膜镀在 150 nm Si₃N₄ 过渡层上后测得的透射光谱。

(2) 拟合结果

表4 当待测薄膜折射率等于过渡层折射率时, 用传统方法检测的厚度极限情况 (单位: nm)

实际厚度 h	10	5	4	3	2.5	2	1	0.1
拟合厚度 h'	10.1	5.1	4.2	3.2	2.8	2.3	1.6	
误差 /%	1.0	2.0	5.0	6.7	12.0	15.0	60.0	

http://journal.sitp.ac.cn/hw

外 红

表 5	当待测演	序膜折射率	等于过	渡层打	斤射率	时,
用本	、文方法相	金测的厚!	度极限情	青况 (車	单位:	nm)

实际厚度 h	10	5	4	3	3	2	1	0.1
拟合厚度 h'	10.0	5.0	4.0	3.0	2.5	2.0	1.0	0.1
误差 /%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

从图 6(a) 和表 4 中可以看出, 使用传统方 法时,不同厚度之间的透射光谱变化较小。在进 行厚度拟合时,误差较大。传统方法的极限厚度 为 $h_{eA} \approx 2.5$ nm。使用本文方法时,光谱变化和

峰位偏移明显,可精确测量到 0.1 nm,故其极限 厚度 $h_{eB} = 0.1$ nm。

2.3.3 待测薄膜折射率小于过渡层折射率的情况 此时将待测薄膜换成 SiO2, 其折射率为1.46。 (1) 透射光谱

图 7(a) 所示为将 SiO₂ 薄膜直接镀在载玻片 基底上后测得的透射光谱。其他设置同图 5。

图 7(b) 所示为将待测 SiO₂ 薄膜镀在 150 nm Si₃N₄ 过渡层上后测得的透射光谱。





图 7 透射光谱 (基底:n=1.52, Si₃N₄:n=2.0, SiO₂:n=1.46)

INFRARED (MONTHLY)/VOL.32, NO.7, JUL 2011

波长/nm

(2) 拟合结果

从图 7(a) 和表 6 中可以看出, 使用传统方法 时, 透射光谱几乎重合, 拟合结果的误差很大, 测量的极限厚度为 14.0 nm。实际上, 在某种衬 底上镀制同样材质的薄膜是根本无法被检测到 的。而采用本文方法时, 不同厚度 SiO₂ 之间的 透射光谱差异依然明显。由表 7 可知, 本文方法 的极限厚度为 1 nm。这两种方法的极限厚度的 差异相当明显, 本文方法的极限厚度比传统方 法的高14倍之多。

此外,由于薄膜材料 TiO₂ 是在可见光区域 具有强吸收的材料,理论上薄膜的吸收越大,其 透射谱对薄膜的厚度变化越敏感,即单位厚度 薄膜所引起的透射谱变化越大。这对于透射谱 的测量和薄膜厚度的提取都是有利的。因此, 使用本文方法和传统方法测量厚度的误差都较 小。而对于 Nb₂O₅ 弱吸收材料,本文方法在厚度 测量时更具有优势。

表 6 当待测薄膜折射率小于过渡层折射率时,传统方法检测的厚度极限情况(单位: nm)

实际厚度 h	30	20	14	10	8	7	5	1
拟合厚度 h'	29.3	19.0	12.6	8.0	5.3	3.6	0.5	
误差 /%	2.3	5.0	10.0	20.0	33.8	48.6	90.0	

表7 当待测薄膜折射率小于过渡层折射率时,本文方法检测的厚度极限情况 (单位: nm)

实际厚度 h	30	20	14	10	8	7	5	1
拟合厚度 h'	30.0	20.0	14.0	10.0	8.0	7.0	5.1	0.9
误差 /%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	10.0

3 结论

本文提出了一种以含有一层厚度足以引起 干涉的过渡层为衬底,通过测量镀上待测薄膜 前后的光谱变化,即可实现薄膜厚度精确测量 的方法。研究结果表明,该方法的测量极限高达 1nm以上,既保持了传统光谱法的所有优势,又 可以精确测量纳米超薄薄膜的厚度。它非常简 单、快捷,而且非常容易实施,特别适用于镀膜 行业的在线检测和实时监控。

期望将来可以将本文方法推广应用到镀膜 系统中,以实现薄膜的精确在线检测和实时监 控,从而进一步提高镀膜系统的工艺水平和镀 膜质量。

参考文献

 [1] 王力衡,黄运添,郑海涛. 薄膜技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.

INFRARED (MONTHLY)/VOL.32, NO.7, JUL 2011

- [2] 杨烈文,关文铎,顾卓明. 材料表面薄膜技术 [M]. 北京:人民交通出版社, 1991.
- [3] 唐晋发,顾培夫. 现代光学薄膜技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
- [4] 唐文彦,张军,李慧鹏. 触针法测量表面粗糙度的 发展及现状 [J]. 机械工艺师, 2000, 28(11): 40-42.
- [5] 宋敏,李波欣,郑亚茹.利用光学方法测量薄膜厚度的研究 [J]. 光学技术, 2004, 30(1): 103-106.
- [6] Kucirek J. Determination of The Optical Constants And Thickness of A Thin Slightly Absorbing Film by Ellipsometric Measurement [J]. Czech, J Phys, 1969, 19(2): 537–545.
- [7] 陈燕平,余飞鸿.薄膜厚度和光学常数的主要测试 方法 [J]. 光学仪器, 2006, 28(6): 84-88.
- [8] Phan L, Michailovits L, Hwvesi I. Determination of The Refractive Index, The Absorption Coefficient And The Thickness of Amorphous V₂O₅ Thin Films form Reflectance Interference Spectra [J]. Acta Physica Hungarica, 1983, 26(3): 119–124.
- [9] 王晟达, 韩崇昭. 光谱法测量薄膜厚度算法的改进[J]. 仪表技术与传感器, 2003, 29(6): 51-54.
- [10] 唐晋发,顾培夫,刘旭,等. 现代光学薄膜技术[M].杭州:浙江大学出版社, 2006.

http://journal.sitp.ac.cn/hw