

光学薄膜厚度的光干涉 测试方法

苏俊宏 著

非外借



科学出版社

光学薄膜厚度的光干涉测试方法

苏俊宏 著

贵州师范学院内部使用

科学出版社

北 京

内 容 简 介

光干涉测试技术是以波长为计量单位的现代光学测试技术的重要组成部分,具有测量结果准确、精度高、过程客观等优点。本书以光干涉测试技术为原理,以光学薄膜厚度参数为测量对象,介绍几种实现光学薄膜厚度测量的光干涉测试方法,包括干涉条纹法、快速傅里叶变换法、相位偏移干涉法、数字叠栅法,以及错位干涉法、外差干涉法和条纹扫描法。本书是作者研究工作的系统总结,具有理论与实践密切结合、论述系统深入、测试结果来源于工作实际的特点。

本书可作为光电测试专业的研究生教科书,也可作为现代光学测试技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

光学薄膜厚度的光干涉测试方法/苏俊宏著. —北京:科学出版社, 2019.9

ISBN 978-7-03-062302-7

I. ①光… II. ①苏… III. ①光学干涉仪—测试方法 IV. ①TH744.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 204543 号

责任编辑:宋无汗 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年9月第 一 版 开本:720×1000 B5

2019年9月第一次印刷 印张:11

字数:222 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

采用光学原理进行精密测试，一直是测试计量技术领域中的主要方法之一。薄膜光学常数（折射率、消光系数）和厚度是薄膜设计和制备所必需的重要参数。由于其随着薄膜制备工艺的不同而不同，因此要制备性能稳定的薄膜器件，提高薄膜器件生产制备的成品率，就必须精确地检测出在各种制备工艺下，薄膜器件的光学常数和厚度值。光学薄膜的厚度是薄膜设计时重点考虑、制备过程中严格监控、检测时精密测量，以及应用时高度关注的参量。为了实现对光传输的各种调控功能，薄膜厚度参数有严格的理论设计值，但在薄膜的制备过程中，膜厚监控装置误差及各种随机因素的影响，往往使得成膜后的厚度实际值与设计值存在一定的偏差，而这种偏差的大小，则需要通过高精度的厚度测试技术和方法来表征。

新型光电器件的不断发展，对光学薄膜各项参数的准确度提出了更高的要求。薄膜的厚度是薄膜制造中需精确监控的参数，厚度的高精度测试是判定薄膜器件制造是否合格的重要一环。因此，研究薄膜光学常数及其厚度的测试技术与方法具有十分重要的意义。

光干涉计量测试技术是以波长为计量单位的一种公认的高精度计量测试技术。干涉仪输出的是一幅干涉图，借助于数学物理模型，可以将干涉图与多种被测参数相联系，从而实现相关物理参数的测量。

在国家国际科技合作计划项目（2010DFR70530）及省部级科技计划项目的支持下，课题组以高精度的光干涉测试为原理，相继开展了采用多种光干涉测试方法对光学薄膜厚度的测量研究，形成了基于高精度光干涉测试技术的薄膜厚度测量系列方法，这是本书的特点之一。全书共 7 章，第 1 章介绍光学薄膜常数及厚度的传统测量方法。第 2 章重点介绍干涉法测量薄膜厚度原理，包括干涉测量装置及其工作原理、干涉条纹图像采集、测试样片制备等。第 3 章在介绍干涉条纹小数部分重合法的基础上，对干涉条纹法测量薄膜厚度技术与方法进行说明。第 4 章介绍通过快速傅里叶变换法对一幅静态干涉图的处理，实现薄膜厚度的测量技术与方法。第 5 章以相位偏移技术为基础，借助干涉测试装置捕获动态干涉条纹，通过一系列关键技术的引入实现动态干涉图的分析与处理，从而获得薄膜厚度。第 6 章介绍数字叠栅法测量薄膜厚度，该技术是集相位偏移技术、莫尔条纹技术、光栅技术、数字图像技术于一体的一种新的测试方法。第 7 章介绍课题组对薄膜厚度测量采用的其他光干涉测试方法，包括错位干涉法、外差干涉法以及

条纹扫描法。

本书第1章、第2章、第5章、第6章由苏俊宏撰写，第3章、第4章由万文博撰写，第7章由时凯撰写，全书由苏俊宏统稿。

在撰写本书过程中，得到了西安工业大学光电工程学院、科技处等部门领导的大力支持，西安工业大学光电工程学院杨利红教授，研究生葛锦蔓、李浩然、帅高龙、石一磊、刘弈辰等为本书付出了艰辛的劳动，在此一并表示感谢。

鉴于作者学识疏浅，加之时间仓促，书中不妥之处在所难免，恳请读者不吝赐教，批评指正。

作 者

2019年8月于西安工业大学未央校区

目 录

前言

第 1 章 光学薄膜参数及其测量	1
1.1 薄膜光学常数的测量	1
1.2 光学薄膜厚度的测量	7
1.2.1 轮廓仪测量法	8
1.2.2 光干涉测量法	8
参考文献	11
第 2 章 干涉法测量薄膜厚度原理	13
2.1 干涉测量装置	13
2.1.1 干涉仪	13
2.1.2 图像采集与处理系统	14
2.1.3 软件系统	15
2.2 干涉仪工作原理	15
2.3 干涉条纹图像的采集	16
2.4 干涉测长原理	18
2.5 薄膜测试样片制备	20
参考文献	21
第 3 章 干涉条纹法测量薄膜厚度	22
3.1 干涉条纹法原理	22
3.2 干涉条纹小数部分重合法	24
3.3 条纹法处理单幅干涉图方法及关键技术	26
3.3.1 干涉条纹小数部分的自动读取	26
3.3.2 干涉条纹整数部分 K 的确定	29
3.3.3 测量结果的修正	30
3.3.4 条纹法测量薄膜厚度的关键技术	31
3.4 干涉条纹法实测薄膜厚度结果分析	37
3.4.1 一号薄膜样片的测试结果及分析	37

3.4.2	二号薄膜样片的测试结果及分析	39
3.4.3	三号薄膜样片的测试结果及分析	40
	参考文献	42
第4章	快速傅里叶变换法测量薄膜厚度	43
4.1	概述	43
4.2	FFT法测量薄膜厚度原理	44
4.2.1	基本原理	44
4.2.2	调制原理	47
4.2.3	数字化原理	48
4.3	FFT法测量薄膜厚度的关键技术	49
4.3.1	处理过程概述	49
4.3.2	干涉图的预处理	50
4.3.3	波面统一	70
4.4	FFT法实测薄膜厚度结果分析	76
4.4.1	FFT法对一号薄膜样片的测试处理结果及分析	77
4.4.2	FFT法对二号薄膜样片的测试处理结果及分析	79
4.4.3	FFT法对三号薄膜样片的测试处理结果及分析	81
	参考文献	83
第5章	相位偏移干涉法测量薄膜厚度	85
5.1	概述	85
5.2	相位偏移干涉法测量薄膜厚度的原理	85
5.3	相位偏移干涉法测量薄膜厚度的关键技术	88
5.3.1	移相器及其标定技术	88
5.3.2	减小非线性误差算法	96
5.3.3	波面统一	99
5.3.4	干涉条纹图像波面复原	104
5.4	相位偏移干涉法实测薄膜厚度结果分析	106
5.4.1	一号样片测量结果及数据分析	106
5.4.2	二号样片测量结果及数据分析	112
5.4.3	三号样片测量结果及数据分析	116
5.4.4	四号样片测量结果及数据分析	120
5.4.5	Zygo干涉仪测量薄膜厚度实例	123
5.4.6	激光平面干涉仪测量薄膜厚度实例	126

参考文献	127
第 6 章 数字叠栅法测量薄膜厚度	129
6.1 概述	129
6.2 数字叠栅法测量薄膜厚度的原理	130
6.2.1 原理方法	130
6.2.2 数字叠栅技术处理静态干涉图范例	131
6.3 数字叠栅法测量薄膜厚度的关键技术	133
6.3.1 移相参考干涉图的生成	133
6.3.2 图像滤波提取莫尔信息	134
6.3.3 波面消倾斜	140
6.4 数字叠栅法实测薄膜厚度结果分析	141
6.4.1 一号薄膜样片测量结果及数据分析	141
6.4.2 二号薄膜样片测量结果及数据分析	146
参考文献	148
第 7 章 薄膜厚度测量的其他光干涉测试方法	149
7.1 波面错位干涉法测量薄膜厚度	149
7.1.1 波面错位的实现方法	150
7.1.2 错位干涉法测量原理	153
7.1.3 错位干涉法测量薄膜厚度实例	155
7.1.4 测试结果处理及分析	157
7.2 外差干涉法测量薄膜厚度	158
7.2.1 外差干涉法测量原理	158
7.2.2 外差干涉法测量薄膜厚度	160
7.3 条纹扫描法测量薄膜厚度	163
参考文献	165

第 1 章 光学薄膜参数及其测量

薄膜作为一种形态特殊的物质，其在厚度上尺寸很小，只是微观可测的量，远远超出了人眼可测量的范围，而且在厚度方向上由于表面、界面的存在，使物质连续性发生中断，由此使薄膜材料表现出与其他材料不同的特性。利用薄膜的光学特性，可以改变光学元件的反射和投射性能，改变光的偏振态和相位。在光谱学的应用中，可以对某些光谱实现带通或带阻等。从发展前景看，人们越来越重视薄膜技术和薄膜材料的研发，光学薄膜在军民两用技术中有着广泛的应用。

随着现代高新技术的飞速发展，现代科学技术在各学科间相互交织、相互渗透，对精密加工制造技术的更高要求，使得光学薄膜与光干涉计量技术广泛地用于微型机械电子、光通信、生物工程、航天航空等高新技术领域，涵盖了工业、农业、通信、交通运输、宇航及军事工业等部门。近十年来，随着光学薄膜的加工及制造技术的进步，光学薄膜的光学稳定性也逐步提升，同时，随之而来的是光学薄膜的制造成本不断降低。如今，光学薄膜已经几乎应用到所有的光学系统、光电仪器之中。利用光学薄膜可以提升光学元件的品质和技术，从而使光电产品更加完善。因此，在光学薄膜的加工制造中，对光学薄膜的检测提出了更高的要求。

薄膜技术是薄膜制备技术和检测技术的总称，包括以物理气相沉积和化学气相沉积为主的制膜技术，以离子束刻蚀技术为代表的精密加工技术，以及薄膜评价、分析和检测技术。薄膜光学常数（折射率、消光系数）和厚度是薄膜设计和制备所必需的重要参数。在设计和计算光学薄膜元件的特性时，常常把块状材料的各项常数作为薄膜的光学常数，而且将薄膜简化成具有均匀折射率 n 、消光系数 k 和厚度为 d 的薄层。但是薄膜的光学常数随着薄膜的制备工艺的不同而不同，因此要制备性能稳定的薄膜器件，提高薄膜器件生产制备的成品率，就必须精确地检测出各种制备工艺下的薄膜器件的光学常数，因此薄膜光学常数的测试是一个十分重要的内容。

1.1 薄膜光学常数的测量

测定薄膜光学常数的常用方法有光度法、表面等离子激元法、布儒斯特角法、椭圆偏振法以及利用波导原理的棱镜耦合器法等^[1]。

光度法是指根据薄膜的透射率和反射率来计算薄膜的光学常数。分光光度计

是测量薄膜特性最常用的仪器之一，利用它可以测量薄膜的光谱透射率曲线 $T(\lambda)$ 。如果加上测量反射率的附件，还能得到光谱反射率曲线 $R(\lambda)$ 。由于分光光度计操作简单、使用方便、测量准确、易于学习，故利用光谱透射率-反射率曲线来计算薄膜的光学常数是最常用的一种方法。

通过光谱透射率与反射率确定光学薄膜的光学常数，以上所述的方法主要用于具有一定厚度薄膜样品的测试分析。如果样品的薄膜厚度很薄，甚至一个透射率或反射率的极值点也没出现，或仅仅出现一个极值点时，这些方法很难使用，因此需要其他方法来确定厚度较薄的薄膜光学常数。较薄的薄膜或金属膜光学常数的确定方法主要有表面等离子激元法、布儒斯特角法以及椭圆偏振法。

(1) 表面等离子激元（或表面等离子波，surface plasma wave, SPW）是一种存在于两个界面之间的表面波，它在垂直于界面的方向上迅速衰减，而在平行于界面的方向上以一定的速度传播。表面等离子激元对表面或界面的状态（或微小变化）非常敏感，是一种十分灵敏的光学探测方法。因此，可以借用表面等离子激元进行薄膜光学参数的测定。在光学薄膜中，可以用表面等离子激元测定金属薄膜的光学常数或金属薄膜表面的介质薄膜的光学常数，也可以用来研究薄膜表面受各种环境因素影响产生的变化。

(2) 布儒斯特角法又称阿贝法，是基于光波在界面上的布儒斯特效应而建立的薄膜光学常数测试方法，主要用于薄膜折射率的测试。其基本原理如图 1.1 所示，当一束平行光以某一角度入射时，空白基板表面与镀膜表面对 p 偏振光的反射率是相同的。这个特殊的入射角称为膜层的布儒斯特角 (θ_B)。当 p 偏振光以 θ_B 从 n_0 媒介入射到 n_1 媒介时（折射角为 θ_1 ），空气/膜层界面消失，振幅反射系数为零，即

$$r_p = \left(\frac{n_0}{\cos \theta_B} - \frac{n_1}{\cos \theta_1} \right) / \left(\frac{n_0}{\cos \theta_B} + \frac{n_1}{\cos \theta_1} \right) = 0 \quad (1.1)$$

于是，

$$\frac{n_0}{\cos \theta_B} - \frac{n_1}{\cos \theta_1} = 0 \quad (1.2)$$

由折射定律得

$$n_0 \sin \theta_B = n_1 \sin \theta_1 \quad (1.3)$$

由式 (1.2) 和式 (1.3) 可知，当 $n_0=1$ 时有

$$n_1 = \tan \theta_B \quad (1.4)$$

这就是布儒斯特角法测量折射率的依据。因此，只要测出 p 偏振光在薄膜表面的反射率消失时的角度，就可以计算出薄膜的折射率。这种方法是将对薄膜折射率的测量转变为对角度的测试，因此能获得较高的测试精度，其测试精度主要取决于布儒斯特角位置的测试与判定。但是，显然该方法仅适合于测试薄膜的折

射率，而无法获得薄膜的厚度。

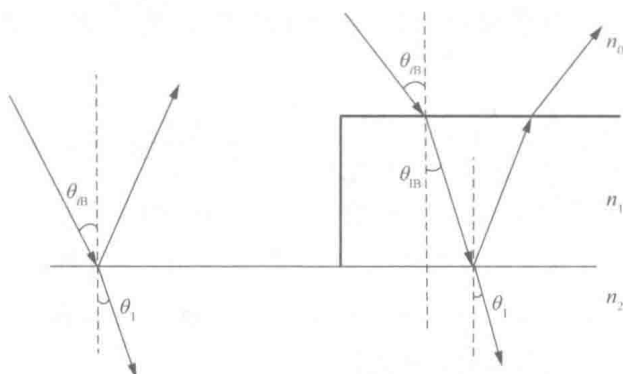


图 1.1 阿贝法测量折射率原理图

(3) 椭圆偏振法是非常灵敏的薄膜光学参数测试的方法，特别是在非透明的薄膜光学常数的测试方面。椭圆偏振测量（椭偏术）是研究两种媒质界面或薄膜中发生的现象及其特性的一种光学方法，其原理是利用偏振光束在界面或薄膜上反射或透射时出现的偏振变换实现对薄膜光学参数的测试。如图 1.2 所示，在一个玻璃基板（衬底）上镀各向同性的单层介质膜后，光线的反射和折射在一般情况下会同时存在的。通常，设介质层为 n_1 、 n_2 、 n_3 ， φ_1 为入射角，那么在 1、2 介质交界面和 2、3 介质交界面会产生反射光和折射光的多光束干涉^[2]。

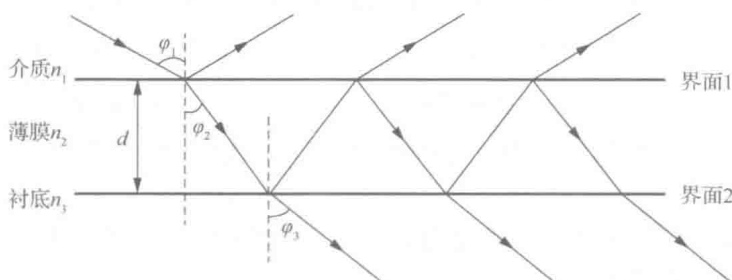


图 1.2 多光束干涉

这里用 2δ 表示相邻两分波的相位差，其中 $\delta = 2\pi n_2 \cos \varphi_2 / \lambda$ ，用 r_{1p} 和 r_{1s} 表示光线的 p 分量和 s 分量在界面 1、2 间的反射系数，用 r_{2p} 和 r_{2s} 表示光线的 p 分量和 s 分量在界面 2、3 间的反射系数。由多光束干涉的复振幅计算可知：

$$E_{rp} = \frac{r_{1p} + r_{2p} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p} r_{2p} e^{-i2\delta}} E_{ip} \quad (1.5)$$

$$E_{rs} = \frac{r_{1s} + r_{2s} e^{-i2\delta}}{1 + r_{1s} r_{2s} e^{-i2\delta}} E_{is} \quad (1.6)$$

式中, E_{ip} 和 E_{is} 分别代表入射光波电矢量的 p 分量和 s 分量; E_{rp} 和 E_{rs} 分别代表反射光波电矢量的 p 分量和 s 分量。现将上述 E_{ip} 、 E_{is} 、 E_{rp} 、 E_{rs} 四个量写成一个比值, 即

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \frac{E_{rp}/E_{ip}}{E_{rs}/E_{is}} = \frac{r_{1p} + r_{2p}e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p}r_{2p}e^{-i2\delta}} \cdot \frac{r_{1s} + r_{2s}e^{-i2\delta}}{1 + r_{1s}r_{2s}e^{-i2\delta}} = \tan\psi e^{i\Delta} \quad (1.7)$$

式中, ρ 为反射系数比, 是一个复数, 可用 $\tan\psi$ 和 Δ 表示它的模和幅角, 即 $\psi = \arctan|r_p/r_s|$, Δ 为 p 光反射相位与 s 光反射相位之差, 称 ψ 和 Δ 为椭圆偏参数。 ρ 是变量 n_1 、 n_2 、 n_3 、 d 、 λ 、 φ_1 的函数 (φ_2 、 φ_3 可用 φ_1 表示)。上述公式的过程转换可由菲涅耳公式和折射公式给出:

$$\begin{cases} r_{1p} = (n_2 \cos \varphi_1 - n_1 \cos \varphi_2) / (n_2 \cos \varphi_1 + n_1 \cos \varphi_2) \\ r_{2p} = (n_3 \cos \varphi_2 - n_2 \cos \varphi_3) / (n_3 \cos \varphi_2 + n_2 \cos \varphi_3) \\ r_{1s} = (n_1 \cos \varphi_1 - n_2 \cos \varphi_2) / (n_1 \cos \varphi_1 + n_2 \cos \varphi_2) \\ r_{2s} = (n_2 \cos \varphi_2 - n_3 \cos \varphi_3) / (n_2 \cos \varphi_2 + n_3 \cos \varphi_3) \\ 2\delta = 4\pi d n_2 \cos \varphi_2 / \lambda \\ n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2 = n_3 \sin \varphi_3 \end{cases} \quad (1.8)$$

若能通过实验测出 ψ 和 Δ , 就可以解出 n_2 和 d (n_1 、 n_3 、 λ 、 φ_1 为已知), 根据式 (1.5) ~ 式 (1.8) 推导出 ψ 和 Δ 与 r_{1p} 、 r_{1s} 、 r_{2p} 、 r_{2s} 、 δ 的关系:

$$\tan \psi = \left[\frac{r_{1p}^2 + r_{2p}^2 + 2r_{1p}r_{2p} \cos 2\delta}{1 + r_{1p}^2 r_{2p}^2 + r_{1p}r_{2p} \cos 2\delta} \cdot \frac{1 + r_{1s}^2 r_{2s}^2 + 2r_{1s}r_{2s} \cos 2\delta}{r_{1s}^2 + r_{2s}^2 + 2r_{1s}r_{2s} \cos 2\delta} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.9)$$

$$\Delta = \arctan \frac{-r_{2p}(1 - r_{1p}^2) \sin 2\delta}{r_{1p}(1 + r_{2p}^2) + r_{2p}(1 + r_{1p}^2) \cos 2\delta} - \arctan \frac{-r_{2s}(1 - r_{1s}^2) \sin 2\delta}{r_{1s}(1 + r_{2s}^2) + r_{2s}(1 + r_{1s}^2) \cos 2\delta} \quad (1.10)$$

式 (1.9) 和式 (1.10) 经计算机运算, 可制作数表或计算程序, 这就是椭圆偏仪测量薄膜的基本原理。

椭圆偏振法测量的应用范围很广, 如半导体、光学掩膜、圆晶、金属、介电薄膜、玻璃 (或镀膜)、激光反射镜、大面积光学膜、有机薄膜等, 也可用于介电、非晶半导体、聚合物薄膜、薄膜生长过程的实时监测等测量。结合计算机后, 具有可手动改变入射角度、实时测量、快速获取数据等优点。椭圆偏振法是一种高灵敏度的薄膜光学常数的检测方法, 对金属薄膜、介质薄膜都适用, 而且因为灵敏度高, 所以也是超薄光学薄膜的基本测试手段。

椭圆偏振法除了可以测试薄膜的基本光学常数之外, 还可以用来测量薄膜的偏振特性、色散特性和各向异性, 特别是研究薄膜生长的初始阶段、沉积晶粒生长到能用电子显微镜观察以前的阶段, 并可用来计算吸附分子层的厚度、密度等^[3]。目前, 椭圆偏振仪的发展非常快, 特别是宽波段的光谱椭圆偏振系统已经成为大

型的表面或薄膜的精密光学检测设备^[4]。

椭圆偏振法具有很高的测量灵敏度和精度。 ψ 和 Δ 的重复性精度已分别达到 $\pm 0.01^\circ$ 和 $\pm 0.02^\circ$ ，厚度和折射率的重复性精度可分别达到 0.01nm 和 10^{-4} ，且入射角可在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 连续调节，以适应不同样品^[5]；测量时间达到毫秒量级，已用于薄膜生长过程的厚度和折射率监控。但是，入射角、系统的调整状态、光学元件质量、环境噪声、样品表面状态、实际待测薄膜与数学模型的差异等因素，会影响测量的准确度^[6-8]。

在光学薄膜的应用中，光波被反射或透射穿过薄膜器件，同时，光束在光谱强度、偏振或相位上被器件所调制。当光波在薄膜波导中传播时，光波是在薄膜内部传播。由于传播方式的不同，光波与薄膜媒介的作用方式也不一样，因此，利用薄膜波导原理来进行薄膜光学常数测试的薄膜波导法应运而生。

如图 1.3 所示，薄膜波导是一个三层结构的波导系统，上层的折射率为 n_0 ；中间层为高折射率薄膜，厚度为 d ，折射率为 n_f ；下层为基板，折射率为 n_s 。当光波以与薄膜的法线成 θ_m 角传播时，在薄膜中稳定传播的条件是满足导波的色散方程，即形成导模：

$$\frac{4\pi}{\lambda} n_f d \cos \theta_m - 2\varphi_{fs} - 2\varphi_{f0} = 2m\pi$$

式中， m 为该导波的模式数，是大于等于 0 的整数。 $2\varphi_{fs}$ 与 $2\varphi_{f0}$ 为光波在薄膜/基板界面以及薄膜/空气界面发生全反射时的反射相位，它们可以表示为

$$\begin{cases} \varphi_{f0} = \arctan \left[\frac{N_m^2 - n_0^2}{n_f^2 - N_m^2} \right]^{1/2} \text{ 且 } \varphi_{fs} = \arctan \left[\frac{N_m^2 - n_s^2}{n_f^2 - N_m^2} \right]^{1/2}, \text{ 对于 TE 波 (s 偏振)} \\ \varphi_{f0} = \arctan \left[\left(\frac{n_f}{n_0} \right)^2 \left(\frac{N_m^2 - n_0^2}{n_f^2 - N_m^2} \right)^{1/2} \right] \text{ 且 } \varphi_{fs} = \arctan \left[\left(\frac{n_f}{n_s} \right)^2 \left(\frac{N_m^2 - n_s^2}{n_f^2 - N_m^2} \right)^{1/2} \right], \text{ 对于 TM 波 (p 偏振)} \end{cases}$$

式中， $N_m = n_f \sin \theta_m$ ，通常称为导波的有效折射率。而 $\beta_m = \frac{2\pi}{\lambda} n_f \sin \theta_m$ ，则称为导波的传播常数，即沿 z 方向的波矢。

分析表明，薄膜越厚，其所能容纳的导模数目越多。大模式数的导模对应的 θ_m 角较小。两种偏振模式的导模传播常数是不同的，也就是说，同样模数的两种偏振导模的传播常数是不同的，即 θ_m 角不同。薄膜波导存在最小厚度，当薄膜小于该厚度时，薄膜之中不可能存在导模。最小的导模传播角 θ_m 也一定大于薄膜与空气或薄膜与基板的全反射角的最大者。

由于薄膜波导的传播角 θ_m 总是大于薄膜与空气或薄膜与基板的全反射角，因此必须采用棱镜耦合效应，才有可能将外部的光波耦合入薄膜波导，形成薄膜中的导模。

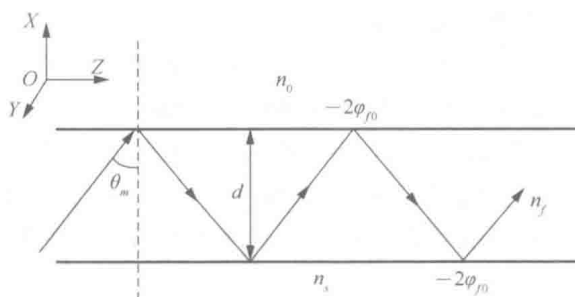


图 1.3 薄膜波导结构示意图

利用波导原理的棱镜耦合法适用于较厚光学薄膜光学常数的测试，特别是对薄膜折射率的各向异性具有很高的灵敏度。棱镜耦合法是通过在薄膜样品表面放置一块耦合棱镜，由于光学隧道效应，发生全反射时，满足耦合条件的入射光将导入被测薄膜，检测和分析不同入射角的出射光，并得到一个反射率曲线，通过测量反射率曲线下降峰的位置，可以确定波导膜的耦合角度，从而根据波导模式的色散本征方程求得薄膜厚度和折射率。棱镜的折射率要大于被测薄膜的折射率，同时要求薄膜的折射率要大于基底材料的折射率，这样在棱镜下面空气、被测薄膜和基底将构成一个三层波导结构，如图 1.4 所示。设棱镜为等腰三角棱镜，其折射率为 n_p ，底边角度为 A_p ，入射棱镜对应 m 级导模的入射角为 φ_m ，在棱镜中与之相对应的 m 级导模的耦合角为 θ'_m ，可以推得

$$\beta_m = k_0 n_p \sin \theta_m = k(n_0 \sin \varphi_m \cos A_p + \sin A_p \sqrt{n_p^2 - n_0^2 \sin^2 \varphi_m}) \quad (1.11)$$

式中， n_0 为棱镜和被测薄膜之间空气空隙的折射率。因此，通过测量耦合模的入射角度 φ_m ，就可以得到关于该导模的传播常数，并通过薄膜导波的色散方程，求解出薄膜的厚度和折射率。

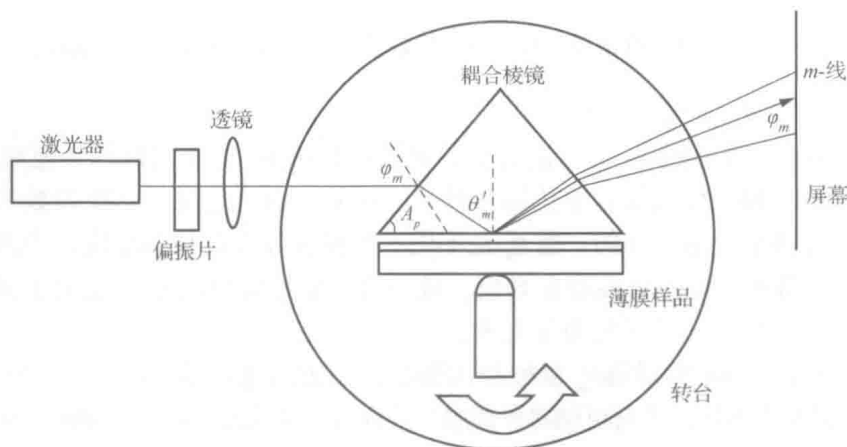


图 1.4 棱镜耦合系统测量图

1.2 光学薄膜厚度的测量

光学薄膜的厚度是一个非常重要的参数，是薄膜设计时需重点考虑、制备中需严格监控、检测时需精密测量，以及应用时需高度关注的参量。为了实现光传输的各种功能，薄膜厚度参数有严格的理论设计值，但在薄膜的制备过程中，往往受膜厚监控装置误差及各种随机因素的影响，使得成膜后的厚度实际值与设计值存在一定的偏差，而这种偏差的大小，则需要通过高精度的厚度测试来表征它们之间的差别。加之随着新型光电器件的不断发展，其对光学薄膜的各种参数的准确度又提出了更高的要求，因此，薄膜的厚度是薄膜制造过程中需精确监控的参数，其厚度值的高精度测试更是判定薄膜器件制造是否合格的最后一个环节。综上所述，开展薄膜厚度的测试技术研究显然具有非常重要的意义。

由于薄膜自身的特点和测量的复杂性，不同于相应的块状材料，薄膜的沉积方法和沉积条件会对薄膜的光学常数和厚度造成影响^[9]。在薄膜镀制过程中，根据膜系设计得到的理论结果与实际镀制结果差别很大，如何精确地测量薄膜的厚度，一直是薄膜研究者非常关注的问题之一。至今，人们提出了很多光学薄膜厚度的测量方法，主要分为两大类：一类是非光学方法；另一类是光学方法。触针法、 α 粒子法、电容法、 χ 射线吸收法等属于非光学方法，这些方法主要基于物理原理，在测量时会对膜层造成伤害；光谱法、椭圆偏振法、棱镜耦合法、波导法、光切法以及干涉法是测量薄膜时用到的基本光学测量方法，利用光学方法测试时，可有效地克服膜层损伤问题^[10]。光学测试方法根据测试时依据的光学原理不同，可分为反射法、透射法、干涉法、衍射法和偏振法等；依据光源照明的不同，可分为激光光源测量和白光光源测量。

薄膜的厚度可以通过 1.1 节所提的光度法和椭圆偏振法获得，也可以用其他方法直接测量薄膜的厚度。直接测量薄膜厚度的主要方法有轮廓仪测量法与光干涉测量法等。表 1.1 列举出了不同薄膜厚度测量方法的应用范围和特点。在这些方法中，大多数只能在薄膜制备完成以后使用，只有少数方法可用于实时测量。

表 1.1 不同薄膜厚度测量方法及特点

测量方法	测量范围	测量精度/nm	备注
轮廓仪测量法	>2nm	0.1	需要制备台阶
等厚干涉法	3~2000nm	1~3	需要制备台阶和反射层
等色干涉法	1~2000nm	0.2	需要制备台阶和反射层，需要光谱仪
变角度干涉法	80nm~10 μ m	0.02~2	透明薄膜和反光基底
等角反射干涉法	40nm~20 μ m	1	透明薄膜
椭圆偏振法	零点几 nm 至数 μ m	0.1	数学分析复杂
石英晶体振荡法	0.1nm 至数 μ m	<0.1	厚度较大时具有非线性效应
称重法	无限制	—	精度取决于薄膜密度

1.2.1 轮廓仪测量法

轮廓仪测量法测量薄膜厚度时,采用的测试装置是探针式轮廓仪。探针式轮廓仪又称为表面粗糙度仪,主要用于测量零件的表面粗糙度。其测量原理是把仪器上细小的探针接触样品的表面,并进行扫描,在扫描过程中,随着探针的横向运动,探针就随着表面高低不平的轮廓上下运动,检测出表面峰谷的高度,因而可以测出基底到薄膜表面的高度,从而进行膜层厚度的测试,如图 1.5 所示。由于探针在垂直方向上的位移可以通过机械、电子或光学的方法放大几千甚至几百万倍,因此垂直位移上的分辨率可以达到 0.1nm 左右。用探针式轮廓仪测试薄膜的厚度必须在薄膜的表面做一个台阶,从而造成一个高度差。做台阶的方法有两种,一种是在镀膜前对基底表面进行遮蔽;另外一种是在镀膜后采用刻蚀的方法去除薄膜。

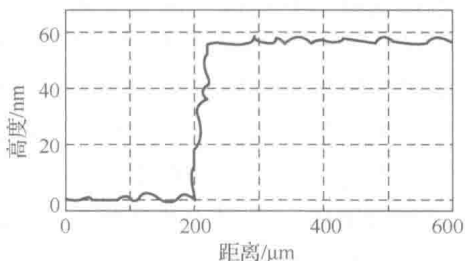


图 1.5 探针式轮廓仪测量薄膜厚度

虽然探针式轮廓仪测量法具有操作简单、测量直观等优点,但是其缺点在于以下两点。

- (1) 容易划伤薄膜,特别是软薄膜的表面并引起测量误差。
- (2) 对表面粗糙的薄膜,其测量误差较大。

尽管在探针上施加的力很小,通常只有 $1\sim 30\text{mg}$,但是由于探针头很小,因而探针对薄膜表面的压强很大,即在薄膜较软时,薄膜表面的划伤以及由此引起的测量误差是不能忽略的。此外,探针的大小也是影响薄膜厚度测量的一个主要因素,探针的直径一般为 $3\sim 40\mu\text{m}$,测量时对薄膜表面的微粗糙度具有一定的积分平滑效应。

1.2.2 光干涉测量法

光干涉计量测试技术是以波长为计量单位的一种公认的高精度计量测试技术。干涉仪输出的是一幅干涉图,借助于数学物理模型,可以将干涉图与多种被测参数相联系,从而实现相关物理参数的测量。

采用高精度光干涉方式测量被测量长度时,可采用国际计量委员会推荐的被定义为基准或副基准光谱辐射线的波长作为标准,以国际米定义为基础的光波干

涉方法直接测量。这种测量方法具有精度高、抗扰动能力强及稳定性好等优点，是最具有发展潜力的薄膜参数测试方法之一^[11]。光干涉法所用到的测试装置简单方便、成本低廉，测试方法直观，在选用白光光源测试时，测量的最小厚度为50nm，如果采用其他辅助方法（如相移法、傅里叶变换等），测量最小厚度可达10nm。实现这种直接测量的方法有双光束干涉法和多光束干涉法。

双光束干涉法的原理是利用光的干涉现象，通过干涉显微镜来实现对薄膜厚度的测量。其干涉系统主要由迈克尔孙干涉仪和显微镜组成，图1.6(a)所示为双光束薄膜厚度测量原理示意图。

由光源发出的一束单色光经聚光镜和分光镜后分成强度相同的参考光束和测量光束，分别经参考反光镜2和样品后发生干涉。两条光路的光程基本相等，当它们之间有一个夹角时，就产生明暗相间的等厚干涉条纹。将薄膜制成台阶，则测量光束从薄膜反射和从基底表面反射的光程不同，它们和参考光束干涉时，由于光程差不同而使同一级次的干涉条纹发生偏移，如图1.6(b)所示。

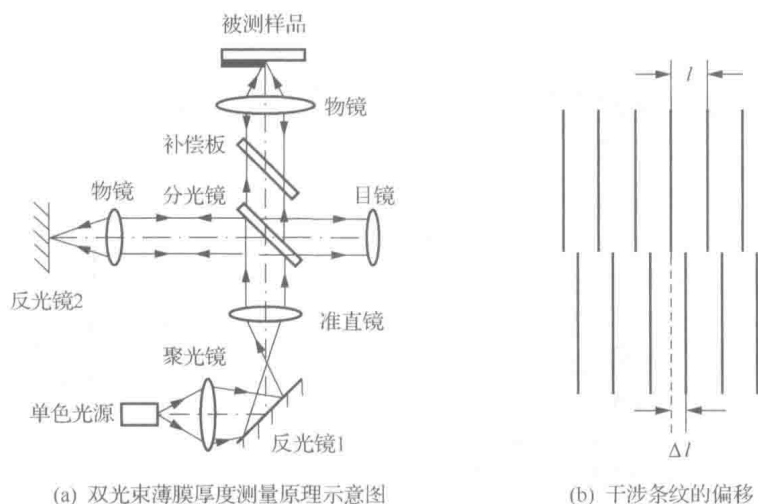


图1.6 双光束干涉法测量薄膜厚度原理示意图

由此便可以求出台阶的高度，即薄膜的厚度为

$$d = \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (1.12)$$

式中， Δl 为同一级次干涉条纹移动的距离； l 为明暗条纹的间距，其可通过测微目镜测出； λ 为入射的已知光波的波长。

该测量方法的特点是非接触、非破坏测量，测量的薄膜厚度范围为3~2000nm，测量精度一般为 $\lambda/20 \sim \lambda/10$ 。

如果在薄膜沉积时或在沉积后能在待测薄膜上制备出一个台阶，也可利用多光束等厚干涉或等色干涉的方法方便地测量出台阶的高度，也就是薄膜的厚度。