

影响基于等厚干涉原理测量膜厚精度的因素分析*

王义全 陈笑 邹斌 蔡园园 黎仪艺 李传波 彭洪尚

(中央民族大学理学院 北京 100871)

(收稿日期:2022-03-28)

摘要:基于光学干涉原理的薄膜测量技术是重要的光电检测技术之一.该测量方法可获得较高的测量精度.但是在实际干涉测量中,膜厚测量的精度与所用光束的物理特性以及膜厚本身有较大关系.基于薄膜干涉的基本原理,分析了光束的发散角、薄膜厚度以及光束的入射角对基于薄膜干涉测长结果的影响,这对学生正确理解基于干涉的测量原理,掌握正确的测量方法,提高测量精度具有一定的指导意义.

关键词:等厚干涉;等倾干涉;测量精度

众所周知,水泡以及许多昆虫(如蜻蜓、蝴蝶等)的翅膀在阳光照射下会出现彩色条纹,这是由于透明薄膜在光束照射下产生了薄膜干涉现象.光学薄膜是一类重要的光学元件,广泛应用于现代光学、光电子学和光学工程等诸多领域.例如,低反射膜常用于望远镜、显微镜和照相机等光学仪器上,大幅提升了该类光学仪器的透光性能.再如,高反射膜常用于激光器谐振腔镜和各类干涉仪镜面上,这对于降低激射阈值,改善激光输出质量具有重要意义^[1].

膜厚是表征薄膜特性的重要参数之一,其厚度的测量一般是基于光的干涉原理.薄膜干涉是扩展光源照在薄膜上产生干涉的现象,主要包括等倾干涉、劈尖干涉、牛顿环和迈克尔孙干涉等^[2-4].薄膜干涉理论的发展为其应用奠定了坚实的物理基础.例如,基于干涉理论的光学薄膜测量逐渐成为一类重要的光学测量技术.利用薄膜干涉进行光学测量最大的特点就是测量精度高,可以达到光的亚波长量级.然而,任何测量都存在一定的误差,基于干涉的测量也不例外.本文基于薄膜干涉理论,系统分析了影响光学测量膜厚精度的因素和改善方案,这对指导学生正确使用薄膜干涉法,完成薄膜厚度等微小尺寸的高精度测量具有一定的指导意义.

1 基于薄膜干涉原理的光程计算

图1是折射率为 n 的薄膜示意图,由光源 S 发出的两条夹角为 β 光线 SC 、 SF 分别照射在薄膜表面的 C 点和 F 点,由 C 点折射进入薄膜的光线在下表面 A 处反射,从上表面 B 处折射出薄膜,与 F 点反射的光线在 P 点相遇而互相叠加形成干涉.

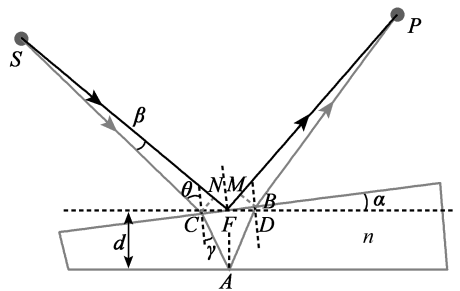


图1 薄膜干涉的光路示意图

两光线相交于 P 点,对应的光程差为

$$\Delta = n(AC + AB) - (FN + FM) \quad (1)$$

设薄膜上下表面的夹角为 α ,光线 SC 照射薄膜的入射角和对应折射角分别为 θ 和 γ ,光线入射点 F 处的膜厚为 d .由此

$$\begin{aligned} FN + FM &= FC \cdot \sin(\theta + \beta) + \\ &FB \cdot \sin(\theta + \beta) = CB \cdot \sin(\theta + \beta) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} AC + AB &= AC + AD + DB = \\ &2 \frac{d}{\cos(\gamma + \alpha)} + \frac{CB \sin \alpha}{\cos(\gamma + \alpha)} \end{aligned} \quad (3)$$

* 国家自然科学基金项目,项目编号:61975247,61675238;中央民族大学优秀教学成果培育项目,项目编号:CG2008.

作者简介:王义全(1964-),男,博士,教授,主要从事大学物理教学和光子晶体、微纳光子材料与器件等方面的研究工作.

$$CB = 2d \tan(\alpha + \gamma) [\cos \alpha + \sin \alpha \tan(2\alpha + \gamma)] \quad (4)$$

将式(2)~(4)代入式(1)中,得

$$\Delta = \frac{2nd}{\cos(\gamma + \alpha)} + 2d \tan(\alpha + \gamma) [\cos \alpha + \sin \alpha \tan(2\alpha + \gamma)] \left[\frac{n \sin \alpha}{\cos(\gamma + \alpha)} - \sin(\beta + \theta) \right] \quad (5)$$

根据空间相干性,为使观察区域具有较好的衬比度,照射在薄膜表面的光束必须为细光束,即夹角 $\beta \approx 0$;同时薄膜一般为厚度均匀的平行膜或厚度变化较小的劈尖,即 $\alpha \approx 0$;且考虑到 $\sin \theta = n \sin \gamma$,因此式(5)可简化为

$$\Delta = \frac{2nd}{\cos \gamma} \left(1 - \frac{1}{n} \sin \gamma \sin \theta \right) = 2nd \cos \gamma \quad (6)$$

根据光场叠加原理,干涉场的分布由两束光的光程差决定.光程差相同的点,光场强度相同,在光场中所有光程差相同点的轨迹构成了干涉场的同一级条纹.

由式(6)可知,光程差是薄膜折射率 n ,厚度 d 和光线在薄膜内的折射角 γ 的函数.一般情况下,薄膜材料为折射率不变的均匀材料,因此在光学测量中光程差变化仅与薄膜厚度 d 和折射角 γ 有关.

2 光束准直性对等厚干涉测量精度的影响

在上述影响光程差的两个因素中,如果光在薄膜上的入射角保持不变,光程差的变化只与薄膜厚度变化有关,此时干涉为等厚干涉.等厚干涉的薄膜一般为劈尖膜.在研究劈尖干涉时,通常是平行光垂直照射薄膜.对于完美劈尖而言,和劈尖交棱距离相等的点所对应的薄膜厚度是相同的,干涉条纹为平行于劈尖交棱平直的明条纹或暗条纹,且相邻亮条纹或相邻暗条纹对应的光程差为 $\frac{\lambda}{2}$.

根据薄膜干涉原理,如果利用干涉法测量薄膜厚度,照射光需严格满足平行光垂直照射劈尖.但在实际测量中,照射光有可能不是严格的准直平行光,而是具有一定的发散角,即照射薄膜不同位置的入射光存在微小角度变化,因此引起了测量结果的偏差.下面我们分析实际测量中因入射光线不平行所

造成的厚度测量误差.

假设照射到薄膜上的光存在一定发散角,则观察到的条纹不再是平行于劈尖交棱的直条纹,而是凸向劈尖交棱的弯曲条纹,如图2所示,同一条纹上不同点虽然光程差相同,但对应薄膜的厚度不同.由于入射到各点的光线入射角不同,从薄膜上下表面反射光的光程差是薄膜厚度和光的入射角度两个参量的函数.图2中同一条纹上的两点 P 和 P' 处的薄膜厚度分别为 h_P 和 $h_{P'}$,两点处光的入射角 i_P 和 $i_{P'}$,则有

$$2nh_P \cos i_P = 2nh_{P'} \cos i_{P'} \quad (7)$$

因为 $i_{P'} > i_P$, $\cos i_{P'} < \cos i_P$,故 $h_{P'} > h_P$,弯曲凸向劈尖交棱边.

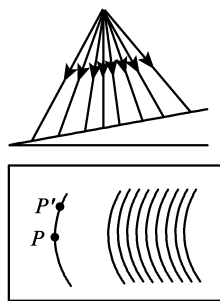


图2 非准直光照射劈尖所形成的弯曲干涉条纹示意图

此时同一条纹上不同的点对应的膜厚就存在一定的差别,在这种情况下如果利用条纹上一点所对应的薄膜厚度,将会带来亚波长量级的测量误差.

从以上的分析结果看,入射光束的发散性影响了薄膜测量结果的准确性.入射光束的发散角越大,干涉条纹弯曲越厉害,与薄膜的等厚线偏差越大.对于给定的条纹,该条纹上各点对应的光程差为常数,即

$$2nh \cos \gamma = \text{常数} \quad (8)$$

式(8)两边求微分

$$-2nh \sin \gamma d\gamma + 2n \cos \gamma dh = 0$$

化简得

$$\frac{dh}{d\gamma} = h \tan \gamma \quad (9)$$

从式(9)可以看出,同一级条纹上的各点所对应的薄膜厚度随入射光束发散角的变化率与光束发散角的正切成正比,即入射光束的发散角越大,条纹与

等高线偏离越大. 另外, 在同一入射角下, 等高线与干涉条纹的偏离度与要测量的薄膜厚度成正比, 膜厚越大, 因光线不准直所造成的测量偏差越大. 因此在利用等厚干涉技术测量薄膜厚度时, 一方面需要尽量改善入射光束的准直度, 另一方面, 测量的薄膜厚度不宜过大, 这样确保即使在入射光束并非严格准直光的情况下, 干涉条纹与等高线的偏离度也较小, 有利于提升测量精度.

3 膜厚对等厚干涉测量精度的影响

下面我们假设入射光束为严格准直光, 讨论由于干涉的定域性对干涉测量精度的影响. 在利用薄膜干涉测量厚度的实验中, 我们一般认为干涉条纹位于薄膜表面上, 所测厚度为条纹所在处的薄膜厚度. 但在实际薄膜干涉中, 考虑到薄膜的厚度, 来自薄膜上下表面的两束反射光并不是在薄膜表面处相遇, 即两束反射光相遇产生的干涉条纹并不是位于薄膜表面上, 而是在薄膜以上或薄膜以下, 如图 3 所示, 因此所测得的薄膜厚度只是该条纹所对应的薄膜厚度, 而非条纹所在位置处的薄膜厚度.

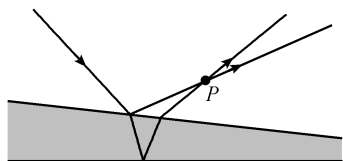


图 3 等厚干涉的示意图

根据薄膜干涉的光程差公式, 设定薄膜的劈尖角和平行光在薄膜上表面的入射角均为 10° , 计算得到薄膜厚度与干涉条纹位置之间的关系, 如图 4 所示.

干涉条纹离开入射点的距离和条纹与薄膜表面的距离均与膜厚呈线性增加关系. 当入射到薄膜表面上的光为一平行宽光束时, 对应于不同厚度的干涉条纹离开各自入射点的距离不同, 因此条纹不是在薄膜的表面, 而是分布在薄膜表面以上或以下的某一复杂曲面上. 薄膜厚度越小, 干涉条纹离开入射点的距离及条纹离开薄膜表面的距离越近. 因此, 只有当薄膜厚度较小时, 才可认为条纹在薄膜表面, 此时测得的薄膜厚度可近似看作条纹所在处的薄膜厚度.

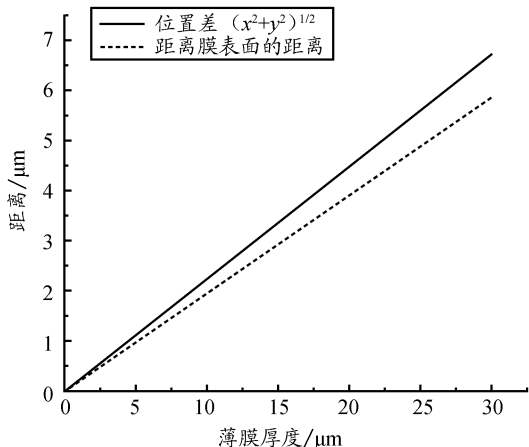
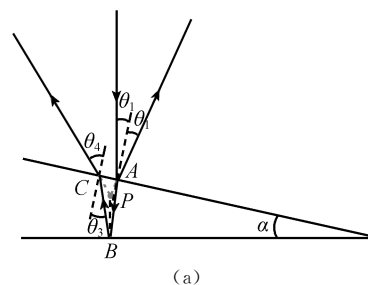


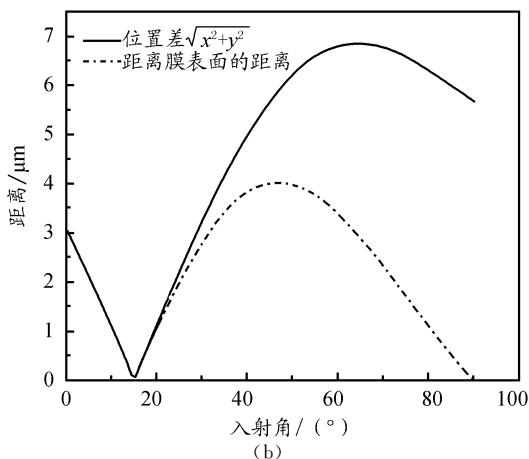
图 4 条纹离开入射点的距离(实线)和条纹与薄膜平面的距离(虚线)与薄膜厚度的关系

4 准直光束的入射方向对等厚干涉测量精度的影响

除入射光束的发散角、薄膜厚度对等厚干涉测量精度有影响外, 准直光束的入射角对测量结果亦有较大影响. 下面讨论在膜厚一定的情况下, 入射角对薄膜干涉条纹位置的影响. 设定薄膜的劈尖角为 15° , 图 5(a) 和 (b) 分别给出了光在薄膜两表面上的反射及条纹位置与平行光束入射角的关系.



(a)



(b)

图 5 干涉条纹离开入射点的距离(实线)和条纹与薄膜平面的距离(虚线)与入射角之间的关系

由图5可见,当膜厚一定时,干涉条纹所在的位置随入射角变化而变化.当入射角较小时,干涉条纹所在的位置处于薄膜上表面的下方,干涉条纹离开入射点的距离随入射角的增大而减小.当光的入射角近似于劈尖尖角时,从薄膜上下表面的反射光相交点接近入射点.当入射角进一步增大时,上下表面反射光的交点,离开入射点的距离及离开薄膜表面的距离随入射角增大而增大,即干涉条纹离开薄膜表面的距离随入射角增大而增大.

5 结论

本文定性分析了基于干涉测量薄膜厚度中测量方法及薄膜本身对测量结果的影响.研究表明,测量所用的光束准直度、光线在薄膜上的入射角以及薄膜厚度均对测量结果有影响.准直光线发散角越大,干涉条纹和等高线的偏离度越大,测量误差越大.对于确定发散度的入射光线,所测厚度对测量精度亦有很大影响.薄膜厚度越大,所造成的等高线与对应的条纹偏离度越大,测量误差越大.在入射光严格准直的情况下,入射角越小,干涉条纹越接近薄膜

表面,所测厚度与条纹所在处的厚度越接近,当光在上表面的入射角等于劈尖薄膜的劈尖角时,干涉条纹位于薄膜表面,所测条纹对应的薄膜厚度为条纹所在处的薄膜厚度.

6 结束语

技术的进步对测量精度要求的提高,是解决未来技术进一步发展的核心问题之一.基于光的干涉原理的检测技术,使测量精度达到光波长量级.本文所分析的各种因素,为避免基于干涉精密测量的偶然误差或干涉中近似所造成的误差提供了解决方案.

参考文献

- [1] 安然,范小贞,卢建新,等. 高光束质量、高功率稳定性激光器的设计及实验研究[J]. 物理学报,2018,67(7).
- [2] 张兆奎,缪连元,张立. 大学物理实验[M]. 北京:高等教育出版社,2016: 235-258.
- [3] 梁铨廷. 物理光学[M]. 北京:电子工业出版社,2012: 142-155.
- [4] 钟锡华. 现代光学基础[M]. 北京:北京大学出版社,2012.

Analysis on the Factors Affecting the Measurement Accuracy of Film Thickness Based on the Principle of Equal-Thickness Interference

WANG Yiquan CHEN Xiao ZOU Bin CAI Yuanyuan LI Yiyi
LI Chuanbo PENG Hongshang

(College of Science, Minzu University, Beijing 100081)

Abstract: Thin film measurement technology based on the principle of optical interference is one of the important photoelectric detection technologies. This measurement method can obtain higher measurement accuracy. However, the accuracy of film thickness measurement depends on the beam characteristics and the film thickness. Based on the basic principles of thin film interference, it systematically analyzes the impact of beam collimation, incident angle, and film thickness on the results of length measurement based on thin film interference. It is significant for students to accurately understand the interference-based measurement principle, master the correct measurement method as well as improving measurement accuracy.

Key words: equal thickness interference; equal inclination interference; measurement accuracy