

# 椭圆测厚仪确定薄膜真实厚度的分析

张俊莲, 黄佐华, 朱映彬

(华南师范大学 物理与电信工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:**用椭圆测厚仪可以测量薄膜一个周期内的厚度和折射率. 本文从理论上分析了采用变入射角确定薄膜的真实厚度时, 存在最大可测厚度周期数和最大可测薄膜真实厚度, 同时用图形形象描述了周期数、厚度周期、一个周期内的厚度、真实厚度之间的关系及它们与入射角的关系.

**关键词:**椭圆测厚仪; 真实厚度; 最大可测周期数; 图形表示

**中图分类号:** O 436.1; **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0712(2008)01-0056-03

椭圆偏振术是一种测量纳米级薄膜厚度和折射率等光学参数的先进技术, 也是研究固体表面特性的重要工具. 由于椭圆偏振术测量精度高, 具有非破坏性和快速等特点, 该方法被广泛应用于物理学、化学、材料学、生物学以及生物工程等领域<sup>[1]</sup>. 我们曾研制成功多功能椭圆测厚仪<sup>[2]</sup>, 已在多所高校和企业推广使用. 本文从理论上分析了采用变入射角确定薄膜的真实厚度时, 存在最大厚度周期数和最大可测真实厚度, 同时用图形形象描述了周期数、厚度周期、一个周期内的厚度及它们与入射角之间的关系.

## 1 变入射角确定薄膜真实厚度的分析

由椭圆测量理论分析可知, 测量样品的一组  $(\Psi, \Delta)$  值, 只能求得一个膜厚周期内的厚度值, 要测量膜厚超过一个厚度周期的真实厚度, 常采用改变入射角或波长的方法, 得到两组或多组  $(\Psi_i, \Delta_i)$ , 并由<sup>[3]</sup>

$$d = m_1 D_{01} + d_1 = m_2 D_{02} + d_2 = \dots = m_i D_{0i} + d_i \quad (1)$$

确定真实厚度  $d$ . 上式中  $D_{0i}$  为厚度周期, 周期数  $m_1, m_2, m_3, \dots, m_i$  为正整数, 它们与入射角有关. 入射角不同, 对应的厚度周期和周期数大小可能不同.  $d_1, d_2, \dots, d_i$  分别为不同条件下所测得的一个周期内的厚度值. 求解式(1)得膜的真实厚度  $d$ . 由于测量仪器和计算机数据处理存在误差, 因此测量薄膜的折射率  $n_2$  和厚度值  $d_i$  也必然存在误差, 从

而引起确定  $m_i$  和  $d$  的困难.

### 1.1 薄膜厚度周期的讨论

由理论分析可知, 薄膜厚度周期为<sup>[1]</sup>

$$D_0 = \frac{\lambda}{2n_2 \cos \varphi_2} = \frac{\lambda}{2\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \varphi_1}} \quad (2)$$

式(2)中的  $n_1$  为空气的折射率,  $\lambda$  为波长,  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别为入射角和折射角. 分析式(2)可知, 薄膜厚度周期与测量条件和样品薄膜折射率有关, 不是一个恒量.  $D_0$  与  $\lambda$  成线性关系、与  $\varphi_1$  成正变关系, 与  $n_2$  成反比例关系, 薄膜折射率越大, 薄膜厚度周期越小. 如图 1 和图 2 所示.

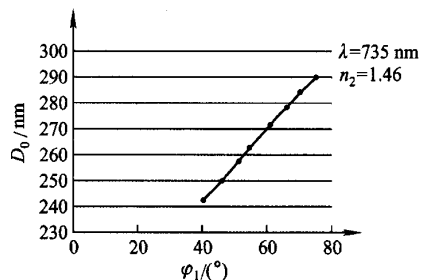


图 1  $D_0$  与  $\varphi_1$  的关系

### 1.2 最大可测厚度周期数

对于单波长椭圆测厚仪, 入射光波长不变, 取两个入射角:  $\varphi_{11} < \varphi_{12}$ , 由式(2)有  $D_{02} > D_{01}$ . 设入射角度变化不大时, 周期数相等, 即  $m_1 = m_2 = m$ , 由式(1)有

$$d = mD_{01} + d_1 = mD_{02} + d_2 \quad (3)$$

收稿日期: 2006-09-22; 修回日期: 2007-05-27

基金项目: 广东省工业攻关资助项目(C60109); 广东省科技计划资助项目(2006B12901020)

作者简介: 张俊莲(1984-), 女, 广东汕头人, 华南师范大学物理与电信工程学院 03 级本科生.

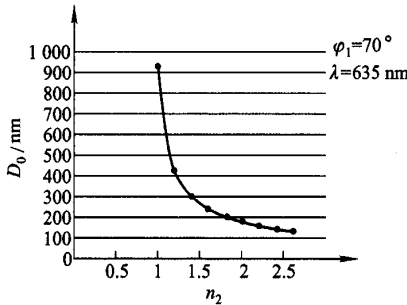


图 2  $D_0$ 与  $n_2$  的关系

式(3)中  $d_1$  和  $d_2$  分别为用椭偏仪在入射角为  $\varphi_{11}$  和  $\varphi_{12}$  时测得的膜厚. 将式(2)代入式(3)整理得

$$d_2 - d_1 = \frac{m\lambda}{2n_2} \left( \frac{1}{\cos \varphi_{21}} - \frac{1}{\cos \varphi_{22}} \right) \quad (4)$$

当入射角  $\varphi_{11} < \varphi_{12}$  时, 折射角  $\varphi_{21} < \varphi_{22}$ , 所以

$$d_1 - d_2 > 0 \quad (5)$$

即随着入射角增大, 当膜厚不太大时, 所测的薄膜在一个周期内的厚度是减少的, 这与实验是符合的<sup>[3]</sup>.

由于仪器存在一定的测量误差, 得到的薄膜厚度  $d_1, d_2$  和  $n_2$  也有误差. 由式(3)确定的  $m_1, m_2$  和  $m$  不一定是严格相等的正整数, 设  $m_1 = m_2 + n$ , 其中  $0 < n < 1$ ,  $m_1$  和  $m_2$  为零或正整数, 由式(1)有

$$d = m_1 D_{01} + d_1 = m_2 D_{02} + d_2 \quad (6)$$

将  $m_1 = m_2 + n$  代入上式有

$$n = \frac{d_2 - d_1}{D_{01}} + \frac{(D_{02} - D_{01})}{D_{01}} m_2 \quad (7)$$

若取  $n \leq \frac{2}{5} = 0.4$ , 则有

$$m_2 \leq \frac{2D_{01} + 5(d_1 - d_2)}{5(D_{02} - D_{01})} \quad (8)$$

可见  $m_2$  是一小于某个确定值的正整数, 与测量条件及薄膜性质有关. 为了计算  $m_2$  可能的取值范围, 根据  $0 < d_1 - d_2 < D_{02}$ , 有

$$\frac{2D_{01}}{5(D_{02} - D_{01})} < \frac{2D_{01} + 5(d_1 - d_2)}{5(D_{02} - D_{01})} < \frac{2D_{01} + 5D_{02}}{5(D_{02} - D_{01})}$$

综上分析可知, 用变入射角确定周期数时, 存在一个最大可测的周期数  $m_2$  和最大可测薄膜真实厚度, 为保守起见, 取

$$m_2 = \frac{2D_{01}}{5(D_{02} - D_{01})} \quad (9)$$

则

$$d = m_2 D_{01} + d_1 \quad (10)$$

我们把由式(9)确定的  $m_2$  称为最大可测薄膜厚度周期数, 把式(10)确定的  $d$  称为最大可测薄膜真实厚度范围. 这是单波长椭偏测厚仪的指标之一.

对于  $\text{SiO}_2$  薄膜, 取  $\lambda = 635 \text{ nm}$ ,  $\varphi_{11} = 65^\circ$ ,  $\varphi_{12} = 70^\circ$ ,  $n_2 = 1.460$ ,  $d_1 = 0$ , 则  $m_2 = 16$ . 因此, 最大可测厚度达  $d = 4.4 \mu\text{m}$ . 对于不同的薄膜和测量条件, 最大可测薄膜厚度周期数和最大可测薄膜真实厚度各不相同.

### 1.3 薄膜真实厚度的测量误差

取薄膜真实厚度为

$$d = mD_{01} + d_1 = \frac{m\lambda}{2} \sqrt{n_{21}^2 - n_1^2 \sin^2 \varphi_1} + d_1 = f(n_{21}, d_1)$$

求微分得厚度测量误差:

$$\Delta d = \left| \frac{\partial f}{\partial n_{21}} \right| \Delta n_{21} + \left| \frac{\partial f}{\partial d_1} \right| \Delta d_1 = \left| -\frac{m\lambda n_{21}}{2} (n_{21}^2 - n_1^2 \sin^2 \varphi_1)^{-3/2} \right| \Delta n_{21} + \Delta d_1 \quad (11)$$

$n_{21}$  为薄膜折射率的测量值, 由式(11)分析可得真实厚度的误差  $\Delta d$  不仅与样品的各个参数有关, 且与周期数有关.  $\Delta d$  随  $d_1$  测量误差变化不大, 但随  $n_{21}$  的测量误差有明显的变动. 尤其是折射率较小时, 真实厚度的误差  $\Delta d$  对折射率的测量误差敏感度较高. 随着折射率的增大, 敏感度越来越低, 如图 3 所示.

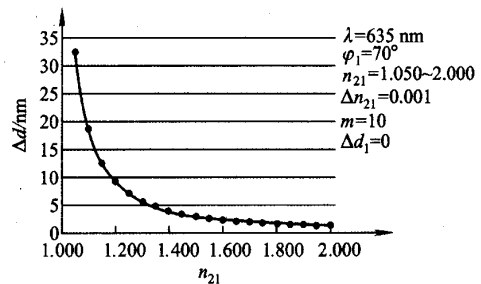


图 3  $\Delta d$  与  $n_{21}$  的关系图

## 2 真实厚度的图形表示及分析

根据式(2), 可用图 4 来表示厚度周期与薄膜厚度的关系, 其中  $D_{00}$  为垂直入射时薄膜的厚度周期, 折射角为 0, 即有

$$D_{00} = \frac{\lambda}{2n_2 \cos \varphi_{20}} = \frac{\lambda}{2n_2} \quad (12)$$

由图 4 中的几何关系可得

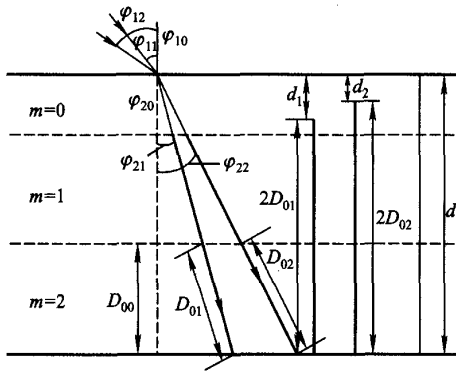


图 4 周期数与真实厚度的关系

$$D_{01} = \frac{D_{00}}{\cos \varphi_{21}} \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)有

$$D_{01} = \frac{D_{00}}{\cos \varphi_{21}} = \frac{\lambda}{2n_2 \cos \varphi_{21}}$$

同理可得

$$D_{02} = \frac{D_{00}}{\cos \varphi_{22}} = \frac{\lambda}{2n_2 \cos \varphi_{22}}$$

上两式与式(2)一样,因此,可以用图 4 形象表示厚度周期与真实厚度的关系。从图中可以得到,测量值  $d_1$  和  $d_2$  为薄膜厚度不超过一个周期时的厚度,其大小与厚度周期  $D_0$  和周期数  $m$  都有关。它们随着入射角的增大而减小,且  $d_1$  大于  $d_2$ ,由图 4 可得

$d_1 - d_2 < D_{02}$ ,与上面的理论分析一致。图 4 可以表示周期数、厚度周期、测量的一个周期内的厚度及真实厚度与入射角之间的关系。

### 3 小结

用椭偏仪测量薄膜厚度时,超过厚度周期的薄膜具有相同的  $(\Psi, \Delta)$  值,只能直接测量一个周期内的薄膜厚度和折射率。本文分析了如何利用变入射角的方法确定真实厚度,用图形形象描述了周期数、厚度周期、一个周期内的厚度、真实厚度之间的关系及它们与入射角之间的关系。运用数学方法分析和估算了最大可测厚度周期数,给出了一种常用薄膜的最大可测周期数及真实厚度的测量范围,并分析了测量误差对确定真实厚度的影响。

### 参考文献:

- [1] Azzam R M A, Bashara N M. Ellipsometry and polarized light[M]. New York: North-Holland Publishing Company, 1977:283-505.
- [2] 黄佐华,何振江,杨冠玲,等. 多功能椭偏测厚仪[J]. 光学技术, 2001, 27(5):432-434.
- [3] 黄佐华,吴雪忠,何振江,等. 椭偏测厚仪数据处理软件设计[J]. 大学物理, 2006, 23(9):41-45.
- [4] 林木欣. 近代物理实验教程[M]. 北京:科学出版社, 1999:133-139.

## The analyses of confirming the film thickness by the ellipsometer

ZHANG Jun-lian, HUANG Zuo-hua, ZHU Ying-bin

(School of Physics & Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The ellipsometer can measure the film thickness in a period and its refractive index. The article investigates that the farthest fathomable periodicities and the farthest film real thickness are existent when the variable incident angles are used to confirm the film real thickness. The graphics mode is proposed to describe the connection between the periodicities, the period, the film thickness in a period and the incident angle.

**Key words:** ellipsometer; film real thickness; farthest fathomable periodicity; graphics mode