

光学膜厚的监控方法

庄秋慧^{1*}, 王三强²¹重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400050;²国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123

摘要 提出了一种提高光电极值法中膜层厚度监控精度的新方法。通过提高判读点的精度,避免了光学极值法中停镀时存在的随机误差;通过算法的处理,将监控信号和光学厚度间的非线性关系转变成了线性关系,并推算出最佳起判时间,避免了监控薄膜沉积时非线性误差对极值点判别的影响。

关键词 薄膜;膜厚监控;判读精度;光学薄膜;光电极值法;精度

中图分类号 O484.4 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.103102

Monitoring Method of Optical Film Thickness

Zhuang Qiuhui^{1*}, Wang Sanqiang²¹College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China;²Electric Power Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Co., Chongqing 401123, China

Abstract A new method is proposed to improve the monitoring accuracy of the thin film thickness in the photoelectricity extremum method. By improving the accuracy of the interpretation points, the random errors occurred when film coating is stopped in the optical extremum method are avoided. The nonlinear relationship between the monitoring signals and the optical thickness is transformed into a linear one and the optimum starting time is deduced by the treatment with algorithms, which avoids the influence of the nonlinear errors on the discrimination of extreme value points in the process of the monitoring thin film deposition.

Key words thin films; film thickness monitoring; interpretation accuracy; optical thin film; photoelectric extreme value method; accuracy

OCIS codes 310.6860; 310.6845

1 引言

在制备具有优异性能的光学薄膜时,不仅需要选择合适的制备工艺与优质的原材料,还需要采取相应措施精确监控薄膜厚度。在实际设计过程中,光学薄膜通常是由多膜层构成,若某层薄膜光学的厚度出现偏差,薄膜的实际光谱性能相较于理论设计会出现偏差,整个薄膜将失去应用价值。

研究人员在光学薄膜膜厚的监控领域不断摸索,研究出了一系列光学薄膜监控方法。膜厚监控方法主要包括光学监控和非光学监控^[1-3]。光学监控方法主要有光电极值法、椭圆偏振法、宽光谱扫描

法^[4-6];非光学监控主要有石英晶振法^[1]。目前,膜厚监控主要采用光学监控。光学监控法在假设膜层无吸收的条件下,利用沉积薄膜的反射率或透射率随着沉积薄膜厚度的增大呈周期性极值变化的特性进行监控^[7-8],也称为光电极值法。采用光电极值法监控膜厚时,临近膜层具有自动补偿特性,该方法已发展成为目前光学薄膜膜厚监控中最普遍使用的方法之一。然而,薄膜的反射率在靠近极值时变化比较缓慢^[2],因此光电极值法在极值点附近的灵敏度较低。当使用光电极值法监控薄膜沉积时,反射率在其极值点附近对于膜层厚度的改变非常不灵敏。因此,光电极值法具有两个主要缺陷:1)极值点的

收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-04-26; 录用日期: 2018-05-09

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究资助项目(KJ1600934, KJ1500935)、重庆市科学技术委员会基础与前沿研究一般项目(cstc201jcyjA0497)、重庆理工大学科研启动基金(2017ZD20)

* E-mail: zqh@cqut.edu.cn

判读精度差;2) 未考虑薄膜整个光谱的光学特性。采用光电极值法监控非规整膜系时,反射率与薄膜的光学厚度之间呈非线性关系,易造成计算机的误判,影响制备的光学薄膜的光学性能。因此,在基于光电极值法的光学薄膜膜厚的监控系统中,准确判读极值点成为整个系统的关键之一^[9]。非规整膜系的光谱性能比规整膜系的更优异,光学薄膜光学性能要求的提高客观上要求能够监控任意膜厚,这已成为光学薄膜领域亟待解决的问题。

本文提出了一种提高光电极值法监控精度的方法,通过算法的处理,将监控信号和光学厚度之间的非线性关系转化成为线性关系,有效避免了由非线性误差引起的光学极值点的判读。

2 膜厚监控的新方法

2.1 理论基础

运用光电测光方式监控镀制过程中膜层的透射率 T 或反射率 R 的极值点数目,得到以 $\lambda/4$ (λ 为波长) 为基本单位的整数厚度的膜层^[6-9]。反射率的计算公式为

$$R = \frac{(n_0 - n_2)^2 \cdot \cos^2 \delta_1 + \left(\frac{n_0 \cdot n_2}{n_1} - n_1 \right)^2 \cdot \sin^2 \delta_1}{(n_0 + n_2)^2 \cdot \cos^2 \delta_1 + \left(\frac{n_0 \cdot n_2}{n_1} + n_1 \right)^2 \cdot \sin^2 \delta_1}, \quad (1)$$

式中 n_0 为空气的折射率; n_1 为膜层材料的折射率; n_2 为基板的折射率; δ_1 为单层膜层的位相厚度。

光学厚度 $n_1 \cdot d_1 = m \cdot \lambda/4$ ($m = 1, 2, 3, \dots$), 其中 d_1 为膜层厚度。当 $\delta_1 = 2\pi/\lambda \cdot n_1 \cdot d_1$ 时, 反射率 R 或透射率 T 为极值。针对一个确定的波长 λ , 当 $n_1 \cdot d_1 = m \cdot \lambda/4$ ($m = 1, 2, 3, \dots$) 时, T 或 R 具有极限值; 针对一个确定的光学厚度 $n_1 d_1$, 当 $\lambda = 4/m \cdot n_1 \cdot d_1$ 时, T 或 R 具有极限值。

结合(1)式, 采用(HL)^X 基本结构实现反射膜的膜系设计, 其中 H 代表高折射率膜层; L 代表低折射率膜层; X 代表膜层数。如图 1 所示。



图 1 反射膜的膜层结构

Fig. 1 Layer structure of reflection film

利用 TFC 软件模拟了 HfO₂ 单层膜的反射率曲线, 如图 2 所示。可以看出, 极值点附近的透射率改变非常缓慢, 导致很难提高光电极值法的监控精

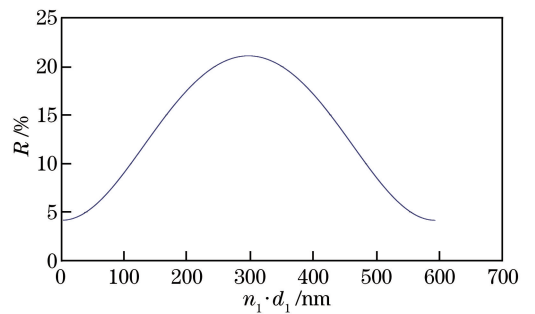


图 2 HfO₂ 单层膜的反射率曲线

Fig. 2 Reflectivity curve of HfO₂ monolayer film

度。为解决该问题, 对反射率 R 求微分, 结果如图 2 所示。可以看出, 当光学厚度 $n_1 \cdot d_1$ 变化时, $dR/d(n_1 \cdot d_1)$ 呈周期性变化。当 R 减小时, $dR/d(n_1 \cdot d_1)$ 为负值; 当 R 增大时, $dR/d(n_1 \cdot d_1)$ 为正值; 当 $dR/d(n_1 \cdot d_1) = 0$ 时, 反射率 R 达到极值点。

$R(\lambda_0)$ (λ_0 为一确定波长) 难以从电路上实现对 $n_1 d_1$ 微分, 假设沉积薄膜的厚度与沉积薄膜的时间 t 近似成正比, 故对时间 t 进行微分, 得到

$$\left(\frac{dR}{dt} \right)_{\lambda_0} \approx \left[\frac{dR}{d(n_1 d_1)} \right]_{\lambda_0}. \quad (2)$$

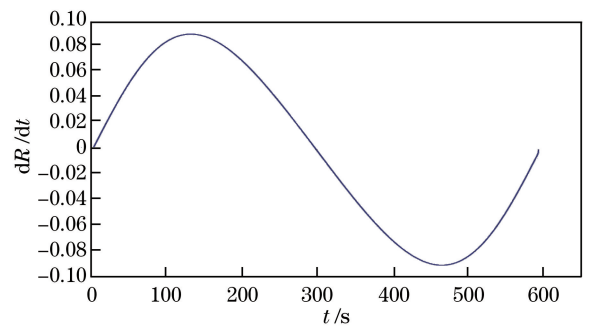


图 3 HfO₂ 单层膜的反射率求微分后的曲线

Fig. 3 Differential reflectivity of HfO₂ monolayer film

对比图 2 与图 3 可以看出, 运用微分法将变化率极小的极值点改为变化率较大的微分信号的零点后, R 的极值点判定改为零点(定值)判读。微分信号在零点位置的变化率最大, 判定误差相应减少。然而, 由图 3 可知, 反射率与薄膜的光学厚度之间呈非线性关系。在 R 的极值点(零点)附近, $\Delta R/\Delta(n_1 \cdot d_1)$ 也很小, 还是很难准确判断极值点。故希望通过算法的处理, 将监控信号和光学厚度间的非线性关系转变成线性关系, 以避免一系列非线性误差。

2.2 膜厚监控新算法

由图 2 可知, 零点附近区域的反射率变化接近线性, 因此可以适当选取停镀点附近的实验数据点

$\{x_n, y_n\} (n=1, 2, \dots, N, N \text{ 为数据点个数})$ 进行直线拟合。拟合直线应尽可能地逼近已知的各个实验数据点。最佳直线方程可表达为

$$y = a^* x + b^*, \quad (3)$$

式中 a^* 、 b^* 为使偏差 $\delta(a, b) = \max_{1 \leq n \leq N} |y_n - ax_n - b|$ 最小的参数, 即 a^* 、 b^* 满足

$$\delta(a^*, b^*) \leq \delta(a, b). \quad (4)$$

由端点法确定系数 a 的初值 $a^{(0)}$, 利用一维优化方法搜索 a^* 。采用逐次逼近方法, 选取合适步长 h , 加快逼近速度。第二个选取的 a 值为

$$a^{(1)} = a^{(0)} + h. \quad (5)$$

若 $u[a^{(1)}] < u[a^{(0)}]$, 其中 u 代表停镀点附近的适当步长数据点对应的反射率函数, 则继续以该步长向下搜索, 取第三个选取的 a 值 $a^{(1)} = a^{(1)} + h$; 若 $u[a^{(1)}] > u[a^{(0)}]$, 取 $a^{(1)} = 1/2[a^{(0)} + a^{(1)}]$ 。以此类推, 并逐步调整步长直至满足一定的精度, 满足条件为

$$|u[a^{(k)}] - u[a^{(k-1)}]| < \epsilon, \quad (6)$$

式中 ϵ 为一给定的极小数; $a^{(k)}$ 为逐次选取的 a 值。

由此求解出拟合后的最佳直线方程, 精确计算出停镀点。在薄膜的实际沉积过程中, 只要观测这条直线就能精确地控制膜层的沉积厚度。图 4 所示为停镀点的线性拟合结果。

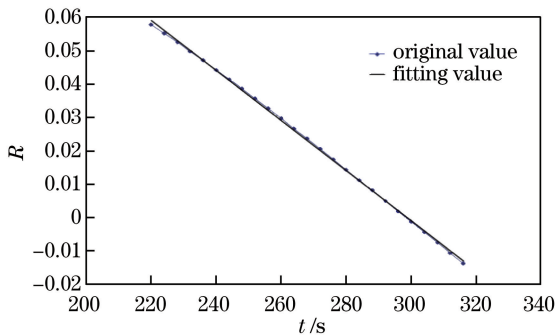


图 4 停镀点的线性拟合结果

Fig. 4. Linear fitting result of stop point

3 实验结果反演

使用日本光驰公司的 OTFC1300 镀膜设备进行监控薄膜沉积的实验。监控薄膜沉积时, 所得薄膜的反射率实测值与求微分后的实测值如图 5 所示。

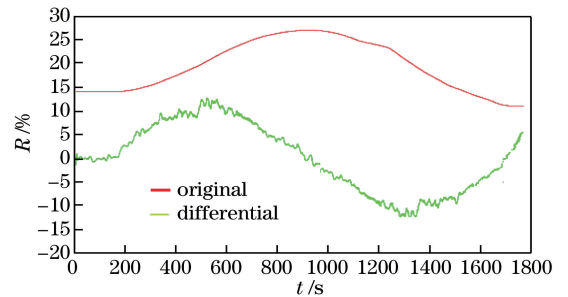


图 5 监控薄膜沉积的实验结果

Fig. 5. Experimental result of monitoring film deposition

由图 5 可知, 原始信号经过微分计算后在 926 s 停镀。拟合时选取 100 个数据点, 对应的时间为 25 s, 根据原始信号的极值点可得到停镀点的位置。经过多次重复实验调整, 确定了最佳的步长 $h = 5$ 。故每次外推 5 个点, 每个点对应的时间为 0.25 s, 拟合不同的直线, 结果如图 6 所示, 从中选出极值点判断最准确的直线方程。表 1 给出了设置起判点的位置与对应的预判时间及拟合对应的直线方程。

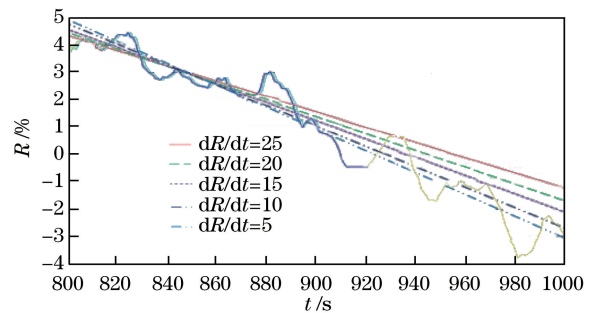


图 6 拟合结果

Fig. 6. Fitting results

表 1 起判点与预判时间的关系

Table 1 Relationship between the point of judgment and the time of prejudgment

Prejudgment position	$dR/dt=25$	$dR/dt=20$	$dR/dt=15$	$dR/dt=10$	$dR/dt=5$
Prejudgment time /s	6.25	5	3.75	2.5	1.25
Linear equation	$y = -0.039x + 36.81$	$y = -0.037x + 34.59$	$y = -0.033x + 31.22$	$y = -0.03x + 28.99$	$y = -0.027x + 26.61$

根据停镀点的位置确定最佳的直线方程为

$$y = -0.03x + 28.99. \quad (7)$$

因此, 监控薄膜沉积时, 提前 2.5 s 开始起判为最佳时间。通过这种新算法的处理, 将监控信号和光学厚度间的非线性关系转变为了线性关系。新算

法与光电极值法的比较见表 2。

通过所提算法进行线性拟合以计算停镀点, 避免了光电极值法中停镀时存在随机误差的缺点, 实现了对极值点的准确判读, 最大限度地抑制了噪声及其他信号的干扰。

表 2 改进的微分法与光学极值法的比较

Table 2 Comparison between improved differential method and optical extremum method

	Improved differential method	Optical extremum method
Monitoring object	Optical thickness of thin films	Optical thickness of thin films
Source of error	Stability of coating process near stopping point	Extreme point interpretation of random error
Error elimination method	Linear fitting operation	Reducing sensitivity of membrane system
Parked point reading	Precise stop plating	Random error

4 结 论

针对光电极值法的极值点判读精度低的难题,提出了一种基于改进微分法的新算法。该算法最大的优势是反射率与光学厚度间呈线性关系。此算法通过线性拟合计算停镀点,解决了光学极值法中停镀时存在随机误差的问题,实现了对极值点的准确判别,最大限度地限制了噪声和其他信号的干扰,为激光薄膜的膜厚监控提供了一种新方法。

参 考 文 献

- [1] Liao Z X, Yang F, Xia W J. Methods and progress of monitoring thin film thickness of optical thin films[J]. *Laser Journal*, 2004, 25(4): 10-12.
廖振兴, 杨芳, 夏文建. 光学薄膜膜厚监控方法及其进展[J]. *激光杂志*, 2004, 25(4): 10-12.
- [2] Mi Q, Zhao L. New algorithm for monitoring optical thin-film thickness[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(2): 248-253.
弥谦, 赵磊. 一种监控膜厚的新算法[J]. *应用光学*, 2014, 35(2): 248-253.
- [3] Yin H, Ying X C, Zong J. Monitoring method for optical thickness of thin film[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 723-727.
殷浩, 应雄纯, 宗杰. 光学膜厚监控方法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4): 723-727.
- [4] Han J. Research on key technologies of optical film

thickness broadband monitoring [D]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University, 2011.

韩军. 光学膜厚宽带监控关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.

- [5] Yoshioka Y, Ikuta T, Taji T, *et al.* Monitoring of Si molecular-beam epitaxial growth by an ellipsometric method [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2001, 40(1): 371-375.
- [6] Wu P Y, Gu P F, Tang J F. Wideband monitoring of optical coatings with deposition error correction[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 2000: 121-132.
- [7] Zhu M P, Yi K, Guo S H, *et al.* Research of an automatic system monitoring thickness of optical thin-film [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(2): 308-311.
朱美萍, 易葵, 郭世海, 等. 光学薄膜膜厚自动控制系统的研究[J]. *光子学报*, 2007, 36(2): 308-311.
- [8] Lin Y X. Optical thin film thickness real-time monitoring system and its inversion research [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
林宇翔. 光学薄膜厚度实时监控及其反演的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [9] Yang M H, Liu J S, Chen Q M, *et al.* Research on monitoring methods for optical thin film deposition[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2001, 38(s1): 500-502.
杨明红, 刘劲松, 陈清明, 等. 光学薄膜淀积监控方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2001, 38(s1): 500-502.