

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0500-03

光学薄膜淀积监控方法研究

杨明红¹ 刘劲松¹ 陈清明²

(¹ 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)
² 武汉金石凯激光技术公司, 武汉 430074)

摘要 提出了一种新型的极值法监控薄膜淀积层厚精度的方法。该方法通过设计和调整监控波长, 改变各层膜的反射率极值过正量而将被镀膜层精确地停镀于对膜厚变化敏感的设计值。运用这一方法可以提高淀积规整膜系的层厚监控精度。

关键词 薄膜淀积, 极值法, 监控精度

中图分类号 O484.4 **文献标识码** A

Study on Optical Thin Film Deposition Monitoring Method

YANG Ming-hong¹ LIU Jin-song¹ CHEN Qing-ming²

(¹ State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)
² Wuhan Jinshikai Laser Technology Company, Wuhan 430078)

Abstract A new method of turn-point-value monitoring is provided in this paper. Deposition is stopped at a point which is sensitive to film depth variation by designing and modulating monitoring wavelength. This method can be used to improve deposition monitoring accuracy.

Key words thin film deposition, turn point value, monitoring accuracy

1 引言

薄膜制备过程中,膜层厚度的准确控制是决定镀膜成功与否的一个关键因素^[1]。对于利用反射率极值法监控的规整膜系淀积,由于监控片的反射率在极值点附近对于膜厚的变化不灵敏,通常采取恒过正量法监控,即各层膜停镀点反射率相对于其极值具有相同相对误差^[2]。这种监控方法会给膜系的每一层膜都带来不同的膜厚过正控制误差值,而且不能准确控制非规整膜系的淀积。

对于不同的膜系,我们可以根据所蒸镀薄膜的膜系结构来选择合适的监控波长,使各膜层的光学厚度均大于监控波长 1/4 的整数倍且正确停镀点的

反射率对于膜厚的变化比较敏感,预先算出各膜层达到设计厚度时反射率相对于极值点的过正量;然后在薄膜淀积过程中,根据每层膜淀积时检测仪实际指示的反射率极值及其变化量,将正确停镀点的过正控制量换算成反射率的指示值;再将膜层准确地止镀于监控片的反射率值正好等于该指示值处。由于这种监控方法在监控同一膜系的不同膜层时所采取的反射率极值过正量各不相同,在此称其为变过正量监控法。

2 理论依据

假设一个规整膜系,设其膜系的设计结构为:

$$\text{SUBSTRACT} | D_1 n_1 | D_2 n_2 | \cdots | D_i n_i | \cdots | D_m n_m | \text{AIR} \quad (\text{A})$$

其中 n_i 为第 i ($i = 1, 2, \dots, m$) 层膜的折射率, D_i (正整数) 为该层膜的光学厚度(以监控波长 λ_f 的四分之一为单位), 总膜层数为 m 。将膜系结构改变为:

$$\text{SUBSTRACT} | (1 + \Delta) D_1 n_1 | (1 + \Delta) D_2 n_2 | \cdots | (1 + \Delta) D_i n_i | \cdots | (1 + \Delta) D_m n_m | \text{AIR} \quad (\text{B})$$

其各层膜的厚度均为 $(1 + \Delta)D_i$ (以新监控波长 λ_f^* 的四分之一为单位,规定 $\Delta \times D_i < 1$),可以证明^[3],当

$$\lambda_f^* = \frac{\lambda_f}{1 + \Delta} \quad (1)$$

时,这两个膜系对于波长相同的入射光具有完全一致的特征矩阵,也就是具有相同的光学特性,即从理论上讲,以 λ_f^* 作监控波长淀积非规整膜系(B)和以 λ_f 作监控波长淀积规整膜系(A),可得到完全等价的成膜。

在采用极值法监控膜层厚度的镀膜机上淀积规整膜系(A)时,其正确停镀点都在对膜厚变化很不灵敏的反射率极值点上,很难将成膜的膜厚控制为设计值;而以 λ_f^* 作监控波长来淀积非规整膜系膜

系(B)时,各层膜的正确停镀点都偏离了监控片反射率的极值点而对膜厚的增加比较敏感,只要能准确地计算出相应于其正确停镀点的反射率值,就可以精确地控制膜层的淀积厚度。所以理论上改变监控波长,使所要淀积的规整膜系变为非规整膜系,反而可使成膜的膜系结构更接近设计值。

我们可以预先由计算机算出膜层达到正确厚度时监控片反射率的极值过正控制量 σ_{IR} ,然后在薄膜的淀积过程中,根据每层膜淀积时检测仪实时指示的反射率极值及其变化量的刻度值的对应关系,将停镀点的过正控制量换算成反射率的指示值 R_{IT}^* ,待检测仪的刻度一达到此值,便立即停止蒸镀。

恰当地选择了监控波长之后,被淀积薄膜的膜系结构为:

$$\text{SUBSTRACT} | (1 + \Delta_1)D_1 n_1 | (1 + \Delta_2)D_2 n_2 | \cdots | (1 + \Delta_i)D_i n_i | \cdots | (1 + \Delta_m)D_m n_m | \text{AIR}$$

(D_i 为正整数, $\Delta_i \times D_i < 1$) 设被镀层为第 i 层($i = 1, 2, \dots, m$),被镀层正确停镀点的反射率极值过正量定义为

$$\sigma_{IR} = (R_{IT} - R_{IC})/R_{IC} \quad (2)$$

其中 R_{IT} 为被镀层达到正确膜厚值时监控片的反射率值, R_{IC} 为淀积该层膜时监控片反射率的第 D_i 个极值, R_{IC} 为监控片反射率的变化幅度。设监控片的折射率为 n_c ,监控光波长为 λ_f^* ,入射角为 θ_0 ,入射介质的折射率为1,监控片已镀膜层的特征矩阵相对于被镀层是一个不变量^[3],设其为 $\begin{bmatrix} m_{11} & j m_{12} \\ j m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$,则在蒸镀第 i 层膜时,监控片的反射率为

$$R_i = (R_S + R_P)/2 \quad (3)$$

$$n_i \sin \theta_i = \sin \theta_0, \quad \eta_i = \begin{cases} n_i \cos \theta_i & (S \text{ 偏振}) \\ n_i / \cos \theta_i & (P \text{ 偏振}) \end{cases}$$

$$R_{S,P} = \frac{[(m_{11} - \eta_c m_{22}) \cos \delta_i + (m_{12} \eta_c \eta_i - m_{21} / \eta_i) \sin \delta_i]^2 + [(\eta_c m_{12} - m_{21}) \cos \delta_i + (\eta_c m_{22} / \eta_i - m_{11} \eta_i) \sin \delta_i]^2}{[(m_{11} + \eta_c m_{22}) \cos \delta_i - (m_{12} \eta_c \eta_i + m_{21} / \eta_i) \sin \delta_i]^2 + [(\eta_c m_{12} + m_{21}) \cos \delta_i + (\eta_c m_{22} / \eta_i + m_{11} \eta_i) \sin \delta_i]^2}$$

$$\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda_f} n_i d_i \cos \theta_i \quad (4)$$

d_i 为被镀层已淀积的物理厚度。

3 实验结果分析

根据上面的理论分析和计算模型,对规整膜系进行了恒反射率过正量和变反射率过正量监控薄膜淀积的对比实验。

规整膜系设计结构为:

$$\text{GLASS} \parallel (\text{HL}) \cdot 3\text{H}2\text{LH}(\text{LH}) \cdot 3 \parallel \text{AIR},$$

其中H、L分别表示膜厚为 $1/4\lambda_f$ ($\lambda_f = 517.5 \text{ nm}$)的高、低折射率膜层。理论计算的透过率曲线和采用恒过正量(过正量为2%)监控法淀积时所得成膜的

透过率实测值均示于图1。

采用变过正量监控法淀积此膜系时,将监控波长选定为 $\lambda_f^* = 431.3 \text{ nm}$,使膜系结构变为:

$$\text{GLASS} \parallel 3.6\text{H}3.6\text{L}3.6\text{H}3.6\text{L}3.6\text{H}3.6\text{L}3.6\text{H}$$

$$7.2\text{L}3.6\text{H}3.6\text{L}3.6\text{H}3.6\text{L}3.6\text{H}3.6\text{L}3.6\text{H} \parallel \text{AIR},$$

监控片的更换位置与恒过正量监控法淀积时一致。采用变过正方法先计算各层膜正确停镀点的反射率极值过正量,也就是使所淀积的膜的透射率变化对于膜厚变化敏感的过正值。图1中曲线3即为变过正监控所得成膜透过率的曲线。对比图中恒过正和变过正控制的曲线可以看出,变过正监控所得的透过率曲线较恒过正监控更接近理想设计,这意味着采用变过正量监控法可提高规整膜系淀积时膜层的监控精度。

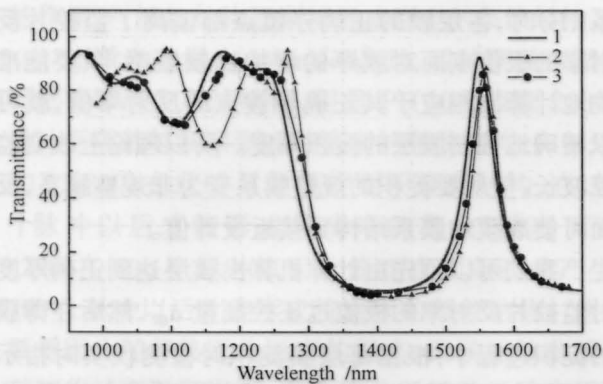


图1 规整膜系实验. 1 为计算曲线; 2 为恒过正量监控所得成膜测试值; 3 为变过正量监控所得成膜测试值

Fig.1 Quarter-wave films experiment. 1: Calculating curve; 2: Constant overshoot test; 3: Variable overshoot test

4 结 论

在极值法监控膜厚淀积的镀膜系统上,采用变

过正量的监控方法可以提高淀积规整膜系时的层厚监控精度,镀制出理想的膜系。

目前,采用极值法监控的镀膜机都是使用统一的过正控制量来自动淀积膜系的每层膜,通过改变和控制膜层淀积的过正控制量,就能使其具有更好的监控性能,获得与设计值更为接近的成膜。

参 考 文 献

- 1 H. A. Macleod. Monitoring of optical coating. *Appl. Opt.*, 1981, **20**:82~87
- 2 A. Thelen. *Design of Optical Interference Coating*. McGraw-Hill, 1988. 148~187
- 3 H. A. Macleod. *Thin-Film Optical Filters*. London: ADAM Hilger Ltd., 1969. 395~399
- 4 林永昌,卢维强. 光学薄膜原理. 北京: 国防工业出版社, 1990. 237~250
- 5 唐晋发,顾培夫. 薄膜光学与技术. 北京: 机械工业出版社, 1989. 125~191