

一种提高极值法监控精度的方法

张晓晖 陈清明 朱伟民 汤炜 杨光

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 提出了一种提高极值法监控薄膜淀积层厚精度的方法。该监控方法通过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其膜厚的设计值。这一方法既可提高淀积规整膜系时的层厚监控精度,也可提高淀积非规整膜系时的层厚监控精度。

关键词: 薄膜淀积 极值监控法 膜厚监控精度 过正控制量

A method to improve the precision of turning point monitoring approach

Zhang Xiaohui, Chen Qingming, Zhu Weiming, Tang Wei, Yang Guang

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: A monitoring method, which can improve the precision of the turning point monitoring approach, is proposed in the paper. This method stops depositing each layer of a film at the point which has different reflectance extreme overshoot so that the structure of the deposited film is similar to the design. It can improve the monitoring precision of a coating with quarterwave or non-quarterwave optical thickness layers.

Key words: film deposition the turning point monitoring approach film thickness monitoring precision overshoot

引言

薄膜制备过程中,膜系层厚的控制精度始终是决定成膜光学特性的一个重要因素^[1]。当采用反射率极值法监控规整膜系的淀积时,因为监控片的反射率在其极值点附近对于膜厚的变化很不灵敏,通常所采取的恒过正量监控法(即各层膜停镀点的反射率相对于其极值具有相同相对误差^[2])会给每层膜都带来不同的膜厚过正控制误差;而且这种监控方法不能准确控制非规整膜系的淀积,有必要对其进行改进。

我们提出了一种提高反射率极值法监控精度的方法,其宗旨是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,故我们称其为变过正量监控法。

1 理论依据

考虑一个规整膜系,设其膜系的设计结构为: SUBSTRATE | $D_1 n_1$ | $D_2 n_2$ | ... | $D_i n_i$ | ... | $D_m n_m$ | AIR (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 $1/4$ 为单位),总膜层数为 m 。如果将膜系结构改变为:SUBSTRACT $(1 + \dots) D_1 n_1 | (1 + \dots) D_2 n_2 | \dots | (1 + \dots) D_i n_i | \dots | (1 + \dots) D_m n_m |$ AIR (B),其各层膜的厚度均为 $(1 + \dots) D_i$ (以新监控波长 λ_f^* 的 $1/4$ 为单位,规定 $\times D_i < 1$),可以证明^[3],当

$$\lambda_f^* = \lambda_f / (1 + \dots) \quad (1)$$

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,那么,从理论上讲,以 λ_f^* 作监控波长淀积非规整膜系(B)或以 λ_f 作监控波长淀积规整膜系(A),可得到完全等价的成膜。

因为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(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,从原理上讲,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。这也正是文献[4]中所阐述的可提高极值法固有精度的一种监控方法,问题的关键是如何实现它。

如果像文献[4]那样预先计算出膜层达到正确厚度时的反射率值,因系统所能检测到的只是监控片反射率的相对值,它们不可避免的漂移会使预先计算出的反射率值变得毫无意义,而每蒸镀一层膜就更换一片监控片的做法更将因膜料在新鲜监控片和已镀有膜层基片上的初始淀积速率不同而使成膜的膜层厚度与设计值相差甚远。

我们实现这种监控方法的做法是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 iR (下标 i 与膜层数相对应: $i = 1, 2, \dots, m$),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,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。

由于预先算出的 iR 是一个相对值,且在计算 iR 时也已计及监控片的已镀层对被镀层反射率极值点的影响,实际淀积时用来判定停镀点的反射率 R_{iT}^* 又是根据最邻近停镀点的反射率极值的刻度值实时换算而得,这种监控方法不会受监控片反射率指示值的漂移而造成的膜厚监控精度下降的影响,可以达到精确监控膜层厚度的目的。

如果膜料本身的色散严重,在波长 λ_f 和 λ_f^* 处具有不同的折射率 $n_i(\lambda_f)$ 和 $n_i(\lambda_f^*)$,则在淀积膜系(B)时,只有以下式中的 λ_{if}^* 作监控波长:

$$\lambda_{if}^* = \frac{n_i(\lambda_f^*)}{n_i(\lambda_f)} \frac{\lambda_f}{(1 + \dots)} \quad (2)$$

才能使其各层膜的物理厚度与膜系(A)的设计值相一致。

对于非规整膜系,只要选择合适的监控波长,使被镀膜系的每层膜的厚度均大于监控波长 $1/4$ 的整数倍,且其正确停镀点处的反射率值对于膜厚的增加比较敏感,也可以通过控制停镀点反射率过正量而使被镀层止镀于正确的光学厚度上,得到膜厚与设计值相一致的成膜。

2 膜层达到正确厚度时监控片反射率极值过正量的计算

在恰当地选择了监控波长后,被淀积薄膜的膜系结构为:SUBSTRACT $(1 + \dots_1) D_1 n_1 | (1 + \dots_2) D_2 n_2 | \dots | (1 + \dots_i) D_i n_i | \dots | (1 + \dots_m) D_m n_m |$ AIR(D_i 为正整数, $\dots_i \times D_i < 1$),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:

$$iR = (R_{iT} - R_{iC}) / R_{iC} \quad (3)$$

式中, R_{iT} 为被镀层达到正确膜厚值时监控片的反射率值, R_{iG} 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^* , 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

$$\begin{pmatrix} m_{11} & j m_{12} \\ j m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}, \text{ 则在蒸镀第 } i \text{ 层膜时, 监控片的反射率为:}$$

$$R_i = (R_S + R_P) / 2 \quad (\text{下标 S, P 分别表示 S, P 偏振}) \quad (4)$$

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

$$n_i \cos \theta_i \quad (\text{S 偏振})$$

$$n_i \sin \theta_i = \sin \theta_0, \quad \theta_i = \arcsin \left(\frac{\sin \theta_0}{n_i} \right) \quad (\text{P 偏振})$$

$$d_i = 2 n_i d_i \cos \theta_i / \lambda^* \quad (d_i \text{ 为被镀层已淀积的物理厚度}) \quad (5)$$

由于这种监控方法实际上已将所有被淀积薄膜的膜系结构改变为非规整膜系, 加上薄膜蒸镀时不同膜层之间的相互补偿作用^[11], 被镀层相应于监控片反射率的第 D_i 个极值点的光学厚度不再是 D_i , 应利用计算机模拟薄膜淀积过程^[3], 以该层膜的淀积速率为步长逐渐增加(5)式中的 d_i , 再代入(4)式通过一维搜索求得 R_{iG} 。 R_{iC} 的值则由下式计算:

$$R_{iC} = \begin{cases} |R_{iG} - R_{i0}| & (D_i = 1) \\ |R_{iG} - R_{iG-1}| & (D_i > 1) \end{cases} \quad (6)$$

式中, R_{i0} 为该层膜起始点 ($d_i = 0$) 的反射率值, R_{iG-1} 为淀积该层膜时监控片反射率的第 $D_i - 1$ 个极值。

为了计算 iR , 采用 Matlab 语言编写了可通用于不同膜系结构的换算膜层光学厚度与其反射率极值过正量的程序^[3]。

在薄膜的实际淀积过程中, 所能观测到的还是监控片的反射率的指示值, 因此, 还必须将计算机所算得的反射率的极值过正量 iR 根据实际的指示值重新解算为膜层达到正确厚度时监控片的反射率的指示值 R_{iT}^* 。

$$R_{iT}^* = R_{iG}^* + iR \times R_{iC}^* \quad (7)$$

式中, R_{iG}^* 为淀积该层膜时检测仪对应于监控片反射率的最后一个极值的指示值, R_{iC}^* 则是 R_{iG}^* 与其相邻极值点(或起始点)的反射率指示值之差的绝对值。

3 实验结果

用 IRROTEC 公司的 EBS-26B 型镀膜机对规整膜系和非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, 实验的工艺条件基本相同。

3.1 规整膜系实验

规整膜系设计结构为: GLASS | 3H3L3H3L3H3L3H6L3H3L3H3L3H3L3H | 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。

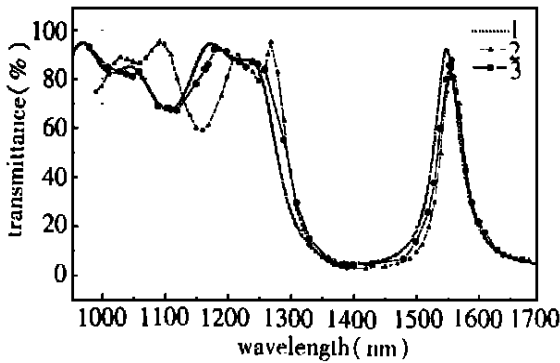


Fig. 1 Experiment result of the film with quarter-wave layers
 1- design transmittance curve 2- measured transmittance of the coating monitored by common turning point technique
 3- measured transmittance of the coating monitored by mutative turning point method

正量监控法可提高规整膜系淀积时膜层的监控精度。

Table 1 The calculated overshoot-quantity(OQ) of each layer

No.	OQ	No.	OQ	No.	OQ	No.	OQ	No.	OQ
*1	60.7 %	4	45.79 %	*7	60.69 %	10	95.89 %	13	83.35 %
2	95.89 %	5	83.35 %	8	47.34 %	11	97.28 %	14	99.89 %
3	97.28 %	6	99.89 %	*9	60.69 %	12	45.79 %	15	48.95 %

3.2 非规整膜系实验

非规整膜系的设计结构为 GLASS|0.3H1.3048L||AIR, 其中 $f = 1550\text{nm}$ 。按此结构计算的透过率曲线如图 2 中曲线 1 所示。

用极值法监控原理淀积非规整膜系时,选择监控波长的基本原则是让尽可能多的膜层为监控波长 $1/4$ 的整数倍。故选用 $f = 459.5\text{nm}$ 作监控波长,使其膜系结构变为 GLASS|1H4.5L||AIR,对此膜系采用恒过正量(过正量为 2%)监控时所得成膜的透射率实测值为图 2 中曲线 2。采用变过正量监控时,选用 $f = 499\text{nm}$ 作监控波长,使其膜系结构变为 GLASS|1.2091H4.0496L||AIR,各层膜反射率极值过正量的计算值分别为 2.3% 和 1.3%,所得成膜的透过率测试值为图 2 中曲线 3。

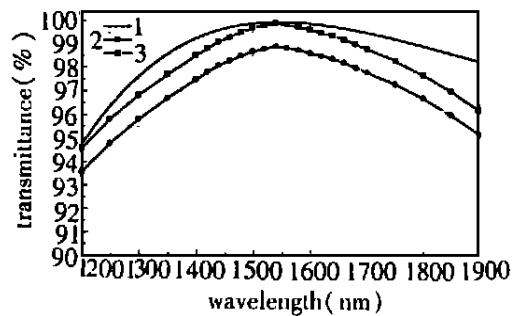


Fig. 2 Experiment result of the film with non-quarter-wave layers
 1- ideal transmittance curve 2- measured transmittance of the coating monitored by common turning point technique 3- measured transmittance of the coating monitored by mutative turning point

比较图 2 中的曲线 2 和 3,同样显示出:变过正量监控薄膜的淀积可得到比恒过正量监控更为满意的结果。

金刚石空芯钻的激光焊接

庞振华 杨惠宁 潘瑞娟

(广州市光机电工程研究开发中心,广州,510630)

摘要: 选用 5 种规格的金金刚石空芯钻头作为激光焊接对象,总结出焊接方法和工艺参数,并给出部分产品的现场使用情况。

关键词: 金刚石空芯钻 激光焊接 工艺参数

Laser welding of diamond core drill

Pang Zhenhua, Yang Huining, Pan Ruijuan

(Guangzhou Research and Development Center of

Optics-Mechanics-Electricity Engineering, Guangzhou, 510630)

Abstract: Five specifications of diamond core drill have been selected as laser welding object. The welding methods and process parameters, such as laser power, welding speed, focused position and assistant gas have been studied. Some practical application results are introduced.

Key words: diamond core drill laser welding process parameter

引 言

金刚石空芯钻是一种新型的钻孔工具,其具有钻孔尺寸精确、速度快、对材料周边无损坏和无需后续工序等特点,因而被广泛的应用于各种石材及钢筋水泥墙的钻孔。在安装水、暖、电、气等各种管道以及其它的打孔施工方面显现出特有的优越性。

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不仅可提高淀积规整膜系时的层厚监控精度,也可提高淀积非规整膜系时的层厚监控精度。

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,如果能设计出可任意设置膜层淀积过正控制量的全自动镀膜机,必然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 周九林. 光学薄膜技术. 北京:国防工业出版社,1974:186
- 2 Macleod H A. Appl Opt,1981;20:82
- 3 张晓晖. 光纤通信用光学薄膜器件的研制. 华中科技大学博士学位论文,2000
- 4 Macleod H A. Thin Film Optical Filters. London:Adam Hilger Ltd,1969:395

作者简介:张晓晖,女,1965年3月出生。博士,副教授。从事光学薄膜及军用激光测距仪的研究。