

文章编号: 0258-7025(2008)10-1591-04

# 电子束蒸发镀膜速率控制

王善成<sup>1,2</sup> 方明<sup>1</sup> 易葵<sup>1</sup> 邵淑英<sup>1</sup> 范正修<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 介绍了电子束蒸发镀膜速率控制的基本原理和方法, 选取实际生产中大量使用且蒸发特性较难控制的 SiO<sub>2</sub> 和 HfO<sub>2</sub>, 对两者的电子束蒸发速率控制分别进行了实验研究。采用比例积分微分(PID)闭环反馈控制, 通过 Ziegler-Nichols 工程经验公式进行原始参量整定, 并在实验的基础上对控制器的原始参量进行调整以及对积分作用和微分作用进行分区处理, 速率控制的实验结果表明, 采用该参量整定方法并结合工艺流程的改进, 能获得良好的速率控制。针对速率控制中存在的难点问题进行了分析, 并提出改进措施: 将速率控制和电子枪扫描控制相结合能进一步改善速率控制。

**关键词** 薄膜; 薄膜工艺; 速率控制; 比例积分微分控制

**中图分类号** O484 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083510.1591

## Rate control in Electron-Beam Evaporated Optical Coatings

Wang Shancheng<sup>1,2</sup> Fang Ming<sup>1</sup> Yi Kui<sup>1</sup> Shao Shuying<sup>1</sup> Fan Zhengxiu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
(<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** The basic principle and methods of rate control in e-beam evaporated optical coatings are introduced. Rate control experiments are performed based on materials of SiO<sub>2</sub> and HfO<sub>2</sub>, whose evaporation characteristics are hard to control. Using the proportion integral differential(PID) closed loop control, the original control parameters were set by Ziegler-Nichols experimental formula. Then the original parameters were adjusted and the integral and derivative roles were dealt with in subarea based on the experiment. The rate control experiment results show that good performance can be achieved by this tuning way combining with improved process flow. The problem existing in rate control are analyzed and the improving methods are proposed. Combining the rate control with e-gun sweep can further improve the rate control performance.

**Key words** thin film; film process; rate control; proportion integral differential

## 1 引言

蒸发速率是电子束蒸发制备光学薄膜<sup>[1]</sup>的重要工艺参量之一, 影响着薄膜的微观结构和化学成分, 对薄膜的光学和机械性质产生很大影响<sup>[2]</sup>, 直接影响厚度均匀性和应力分布<sup>[3]</sup>。蒸发速率失控将导致薄膜应力失控, 不可能得到厚度均匀的薄膜。其他如薄膜的光学常数等, 也对蒸发速率有明显的依赖关系<sup>[4~6]</sup>。

真空度和基板温度的测控比较容易, 已满足实际镀膜的要求<sup>[7]</sup>; 膜厚控制的研究和应用也比较成熟<sup>[8,9]</sup>, 而蒸发速率则成为工艺控制的难点和重点。目前对速率的控制主要有两种方法, 一种是人工控制, 但这种方法反应慢, 调节凭个人经验而缺乏一种理论上的根据, 效果不理想且存在很大波动性; 另外一种是采用商用的膜层沉积控制仪, 由于是面对一般性且控制算法不灵活、参量调整困难<sup>[10]</sup>, 在具体的一台镀膜机上使用时缺乏针对性, 控制效果也不

收稿日期: 2008-03-10; 收到修改稿日期: 2008-04-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(10704078)资助课题。

作者简介: 王善成(1980-), 男, 湖北人, 硕士研究生, 主要从事光学薄膜工艺控制的研究。

E-mail: wschust@siom.ac.cn

导师简介: 易葵(1970-), 男, 湖南人, 研究员, 硕士生导师, 主要从事光学薄膜制备工艺和测试技术的研究。

E-mail: ky@siom.ac.cn

理想。采用石英晶振探测蒸发速率,并用计算机进行处理就可方便地实现对速率控制的研究,目前国外有些单位已有应用<sup>[6,11]</sup>。

SiO<sub>2</sub> 和 HfO<sub>2</sub> 是光学镀膜中大量使用的膜料。SiO<sub>2</sub> 是局部升华蒸发,HfO<sub>2</sub> 是局部熔融蒸发<sup>[6]</sup>,对它们的速率控制较金属材料难度大。本文选取这两种膜料进行了速率控制的研究,其他膜料的速率控制可作为借鉴。由于可根据不同膜料和镀膜机系统对算法进行修改,速率控制效果大大改善。

## 2 原理及方法

采用闭环反馈控制,其原理如图 1<sup>[6]</sup> 所示。controller 和 process 分别代表控制器和被控对象。不断测量被控对象的输出  $y$  并和设定的目标值  $r$  比较,通过控制器输出一个合适的控制量  $u$  给被控对象,使得被控对象的输出  $y$  能在输入扰动  $d_i$  和输出扰动  $d_o$  出现的情况下达到设定的目标值  $r$ 。

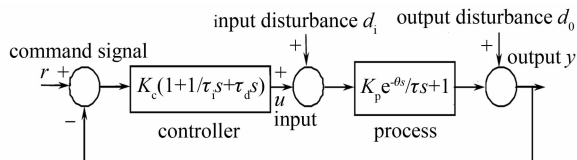


图 1 蒸发速率闭环控制原理图

Fig. 1 Schematic of evaporation rate closed loop control

控制器采用工业上广泛应用的比例-积分-微分(PID)控制器,其控制算法为

$$u = K_c \left( e + \frac{1}{\tau_i} \int e dt + \tau_d \dot{e} \right), \quad (1)$$

其中  $e$  为设定值  $r(t)$  与实际输出值  $y(t)$  构成的偏差信号  $e(t) = r(t) - y(t)$ ,  $K_c$  为比例系数,  $\tau_i$  为积分时间常数,  $\tau_d$  为微分时间常数。当采用计算机控制时,(1)式算法进行离散化处理为数字 PID 控制器。速率控制的难点就在于针对一个具体被控对象(由  $K_p$ ,  $\theta$  和  $\tau$  决定,其中  $K_p$  为过程增益,  $\theta$  为滞后时间,  $\tau$  为时间常数)找到一组合适的 PID 控制器参数( $K_c$ ,  $\tau_i$ ,  $\tau_d$ )以达到良好的控制目的。

被控对象为电子束蒸发镀膜系统,可近似用一阶惯性加纯延迟环节表示<sup>[6]</sup>,传递函数为

$$G_p(s) = K_p e^{-\theta s} / (\tau s + 1), \quad (2)$$

在控制原理图中被控对象的特性由  $K_p$ ,  $\theta$  和  $\tau$  这三个参量决定。 $s$  是由时域  $t$  经拉普拉斯变换为频域所得变量。

对于式(1)的控制器,可采用 Ziegler-Nichols 工程经验整定公式进行参量整定<sup>[12]</sup>

$$\begin{cases} K_c = 1.2\tau / K_p \theta \\ \tau_i = 2\theta \\ \tau_d = 0.5\theta \end{cases}, \quad (3)$$

由式(3)可知,若能得到式(2)表示的被控电子束蒸发镀膜系统的特性参量  $K_p$ ,  $\theta$  和  $\tau$ ,则可以计算出相应 PID 控制器的参量  $K_c$ ,  $\tau_i$ ,  $\tau_d$ 。

一个简便易行的方法是得到被控系统的阶跃响应曲线,通过作图法得式(2)的参量  $K_p$ ,  $\theta$  和  $\tau$ 。作图法的原理如图 2<sup>[12]</sup> 所示。

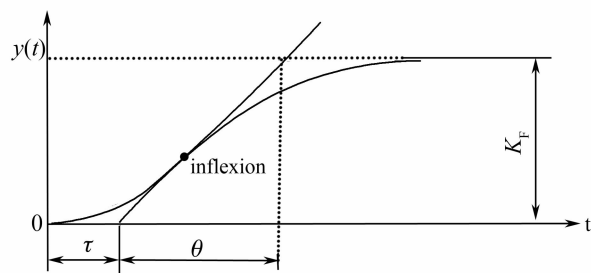


图 2 阶跃响应曲线作图法示意图

Fig. 2 Sketch map of drawing method for step response

镀膜机采用的是北京光学仪器厂的 zzs-800,带两把电子枪,分别装载 SiO<sub>2</sub> 和 HfO<sub>2</sub> 膜料,Telemark 860 晶控仪探测的实时蒸发速率通过串口传给程序控制的计算机,进行记录和处理。对装载膜料为 SiO<sub>2</sub> 和 HfO<sub>2</sub> 的电子束蒸发镀膜系统分别做阶跃响应,其响应曲线如图 3 所示。

图 3 中,上部的曲线代表蒸发速率,下部的曲线则是对应的灯丝电压。在图 3 的基础上结合式(2)通过作图法分别拟合装载膜料为 SiO<sub>2</sub> 和 HfO<sub>2</sub> 的电子束蒸发镀膜系统的传递函数,得式(2)中的  $K_p$ ,  $\theta$  和  $\tau$ ,结果如表 1 所示。作图法虽然拟合程度较差,但简单实用且实践证明它可以成功用于 PID 控制器参量整定<sup>[13]</sup>。

表 1 对 zzs-800 上 SiO<sub>2</sub> 和 HfO<sub>2</sub> 阶跃响应曲线用作图法处理结果

Table 1. Processing results of step response of SiO<sub>2</sub> and HfO<sub>2</sub> at zzs-800 by drawing method

|                                   | SiO <sub>2</sub> | HfO <sub>2</sub> |
|-----------------------------------|------------------|------------------|
| $K_p / (10^{-10} \text{ m/s/\%})$ | 4.2              | 0.2286           |
| $\theta / \text{s}$               | 1.425            | 1.95             |
| $\tau / \text{s}$                 | 3.35             | 3                |

因为膜料蒸发特性参量随着蒸发材料温度非线性变化<sup>[13]</sup>,而束流是影响蒸发温度的决定性参量之一,因此对电子束蒸发镀膜系统做阶跃响应应在和实际镀膜的束流相近的条件下进行。以上 SiO<sub>2</sub> 和

HfO<sub>2</sub> 的阶跃响应曲线分别是在采用 100mA 和 180mA 的束流预融的条件下做的。

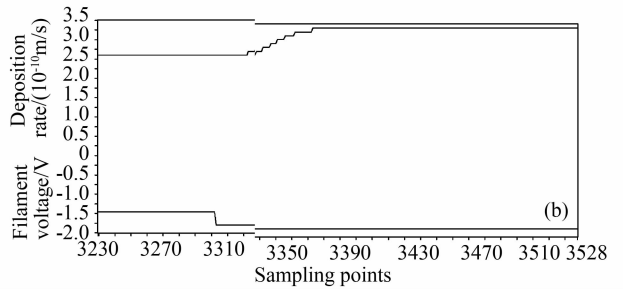
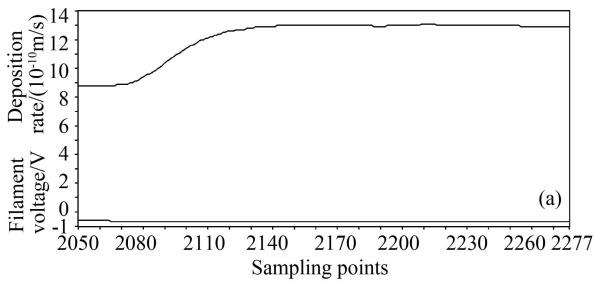


图 3 zzs-800 镀膜机上的 SiO<sub>2</sub> (a) HfO<sub>2</sub> (b) 的阶跃响应

Fig. 3 Step response of SiO<sub>2</sub> (a) HfO<sub>2</sub> (b) at zzs-800

### 3 闭环控制实验

在 zzs-800 设备上对 SiO<sub>2</sub> 和 HfO<sub>2</sub> 进行了实际的蒸发速率闭环控制实验。根据表 1 的数据用式 (3) 来计算得 PID 控制器的原始参量。在具体的实验中可根据实际的速率控制表现, 以原始参量为调节起点进行不断调整, 以得到满意的控制。

以下实验中提到的焦斑移动幅度在半个焦斑直径到一个焦斑直径之间, 大幅度焦斑移动幅度在一个焦斑直径以上。

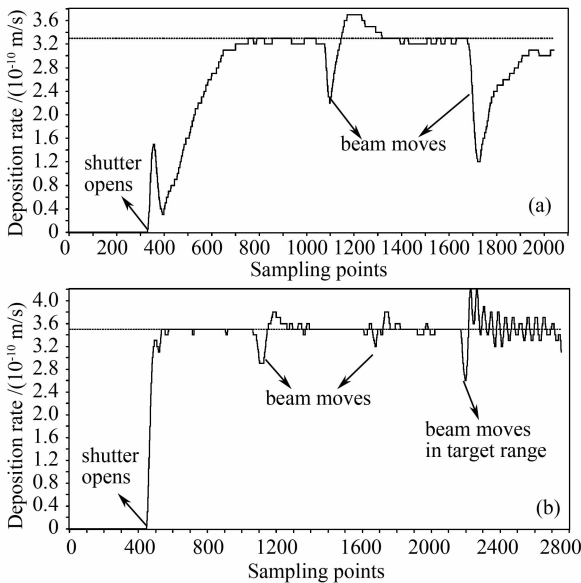


图 4 zzs-800 上的 HfO<sub>2</sub> 的速率 PID 控制曲线, 原始参量, 目标速率 3.3/(10<sup>-10</sup> m/s) (a) 控制器经过调整, 目标速率 3.5/(10<sup>-10</sup> m/s) (b)

Fig. 4 Deposition rate control performance for HfO<sub>2</sub> at zzs-800 PID original parameter, 3.3/(10<sup>-10</sup> m/s) (a) 3.5/(10<sup>-10</sup> m/s) setpoint (b)

图 4(a) 为原始参量控制的结果, 从中可看到速率控制需要注意的两个基本问题。首先是开挡板到

蒸发速率首次到达目标速率的调整时间过长, 其次在焦斑移动的扰动下速率恢复稳态时间过长。镀膜机经现场实验-实验数据分析-PID 控制器调整这样一个反复的实验过程, 速率控制得到改善, 如图 4 (b) 所示, 其中的 PID 控制器调整主要是对微分作用和积分作用分别进行区间处理以及对 PID 系数进行微调, 同时对工艺流程进行改进。

观察图 4 (b) 可见, 在大幅度移动焦斑情况下, 速率稳定慢。为达到良好的速率控制, 需要防止大幅度移动焦斑的扫描方式。

对 SiO<sub>2</sub> 的蒸发速率控制经过相同的过程后得到如图 5 所示速率控制曲线。

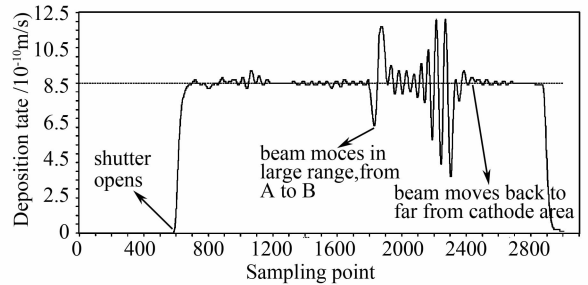


图 5 zzs-800 上的 SiO<sub>2</sub> 的速率 PID 控制曲线, 控制器经过调整, 目标速率 8.5/(10<sup>-10</sup> m/s)

Fig. 5 Deposition rate control performance for SiO<sub>2</sub> at zzs-800, PID adjusted, 8.5/(10<sup>-10</sup> m/s) setpoint

由图 5 可见, SiO<sub>2</sub> 的速率控制曲线中可看到初始过程调节时间短, 焦斑移动的情况下速率恢复快。但大幅度移动焦斑从坩埚的远阴极到近阴极时 (如图 6 中的 A 处移动到 B 处) 速率波动较大, 焦斑移回到远阴极时速率又恢复稳定。在反复的实验中均发现这一现象。造成这一现象的原因是阶跃响应对应的是坩埚的中间偏远阴极位置的材料蒸发特性, 而焦斑在远阴极和近阴极的聚焦特性差别较大<sup>[11]</sup>,

造成材料的蒸发特性也差别较大。因此在焦斑从远阴极移动到近阴极的过程中,材料蒸发特性变化较大,而 PID 控制器的参量没有相应的改变,故控制效果变差。解决这一问题必须对坩埚进行分区,如远阴极区和近阴极区,对焦斑聚焦特性差别比较大的这些区域分别进行阶跃响应,重复本文所述的过程,以得到各自区域的最佳 PID 控制器参量;并将电子枪的扫描控制参量反馈给速率控制程序,当焦斑移动到某一区域时则速率控制程序采用相应的 PID 控制器参量。

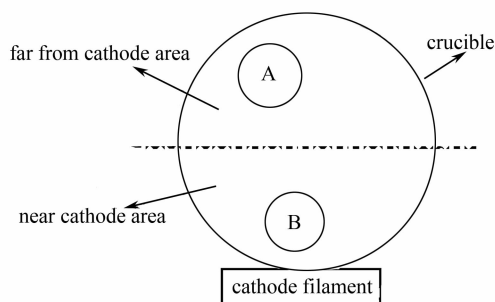


图 6 坩埚分区示意图

Fig. 6 sketch map of crucible partition

## 4 结 论

对当前镀膜实践中广泛使用的真空电子束镀膜的蒸发速率控制进行了研究,采用工业上广泛使用的 PID 控制器,并对控制器参量采用 Ziegler-Nichols 经验公式进行整定得初始的参量,在此基础上通过实验对 PID 控制器及其参量进行修改和调节得到了满意的控制表现。针对  $\text{SiO}_2$  和  $\text{HfO}_2$  的速率控制研究过程也可推广到其他使用到的膜料。另外,还针对速率控制中存在的问题进行了分析,并提出了进一步的改进措施。

## 参 考 文 献

- 1 Lu Jinjun, Liu Weiguo. Optical Thin Film Technology[M]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press,2005,123  
卢进军,刘卫国. 光学薄膜技术[M]. 西安:西安工业大学出版社,2005,123
- 2 Tang Jinfa,Gu Peifu, Liu Xiu *et al.*. Modern Optical Thin

Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006, 227

唐晋发,顾培夫,刘旭等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006,227

- 3 Shao Shuying, Fang Zhengxiu, Fan Ruiying *et al.*. Study of residual stress in  $\text{ZrO}_2$  thin films[J]. *Acta Optical Sinica*, 2004, **24**(4): 437~441  
邵淑英,范正修,范瑞瑛等.  $\text{ZrO}_2$  薄膜残余应力实验研究[J]. 光学学报,2004, **24**(4): 437~441
- 4 Yu Hua, Cui Yun, Shen Yanming *et al.*. Deposition rate's effects on properties of  $\text{LaF}_3$  films prepared by thermal boat evaporation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1557~1561  
余华,崔云,申雁鸣等. 沉积速率对热舟蒸发  $\text{LaF}_3$  薄膜性能的影响[J]. 中国激光, 2007, **34**(11): 1557~1561
- 5 Zhan Meiqiong, Zhang Dongping, Yang Jian *et al.*. Thickness monitoring by quartz crystal oscillation for optical coating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 585~588  
占美琼,张东平,杨健等. 石英晶体振荡法监控膜厚研究[J]. 光子学报,2004, **33**(5): 585~588
- 6 M. Gevelber, B. Xu, N. Duanmu *et al.*. Improving rate control in electron-beam evaporated optical coatings[C]. 46<sup>th</sup> Annual Technical Conference Proceedings of Society of Vacuum Coaters, 2003, 305~310
- 7 Shen Yanming, He Hongbo, Shao Shuying *et al.*. Influences of deposition temperature on residual stress of  $\text{HfO}_2$  films prepared by electron beam evaporation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 827~831  
申雁鸣,贺洪波,邵淑英等. 沉积温度对电子束蒸发  $\text{HfO}_2$  薄膜残余应力的影响[J]. 中国激光, 2006, **33**(6): 827~831
- 8 Zhu Meiping, Yi Kui, Guo Shihai *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
- 9 Zhu Meiping, Yi Kui, Guo Shihai *et al.*. Effect of thickness monitoring error and inhomogeneity of witness glass on film thickness monitoring[J]. *Acta Optical Sinica*, 2006, **26**(7): 1107~1111  
朱美萍,易葵,郭世海等. 膜厚监控误差及监控片不均匀对膜厚监控的影响[J]. 光学学报, 2006, **26**(7): 1107~1111
- 10 Model 860 Deposition Controller Instruction Manual [M]. Telemark Instruments Inc., 1998, 6-1~6-5
- 11 Bing Xu, Michael Gevelber, Douglas Smith *et al.*. E-gun sweep design to improve silica coating performance; E-gun nonlinearity investigation and silica evaporation modeling for sweep design [C]. 49<sup>th</sup> Annual Technical Conference Proceedings, 2006, 319~325
- 12 Tao Yonghua. The control and applications of new PID[J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 1997, (4): 60~64  
陶永华. 新型 PID 控制及其应用[J]. 工业仪表及自动化装置, 1997, (4): 60~64
- 13 Wang Jun, Chen Yuwen, Zeng Xianliang. Design of SH623 cut tobacco dryer's PID controller based on IMC principle[J]. *Control Engineering of China*, 2006, **13**(3): 259~261  
王俊,陈裕文,曾宪良. 基于内模原理的烘丝机 PID 控制器设计[J]. 控制工程, 2006, **13**(3): 259~261