

光学薄膜制作过程自动监控系统的研究

张会林*

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

1 研究背景和意义

随着现代科学技术的飞速发展, 光学薄膜器件得到了越来越广泛的应用, 从人造卫星到现代的光纤通信, 其中都有起着重要作用的光学薄膜器件。同时, 随着用户要求的提高, 对光学薄膜制作精度的要求也越来越高。而光学薄膜的制作是一个涉及到许多学科的复杂过程, 受到不同材料、不同工艺以及一些突发因素的影响。以往的镀膜工作在很大的程度上是凭经验来进行的。因此, 如何通过对其中的一些主要因素的自动控制来提高薄膜制作的效率, 减轻镀膜工作者的劳动强度, 提高光学器件的光谱性能, 一直是光学薄膜制作过程中的焦点问题。利用计算机技术来自动监控光学薄膜器件的制作过程, 可以大大提高光学薄膜器件制作的重复性和制作精度。因此, 开展红外光学薄膜过程的自动监控系统的研究是项非常有意义的工作。

2 国内外的的发展现状和发展趋势

光学薄膜制作过程的自动监控主要涉及到以下内容: 设定真空的抽取及维持; 基片温度; 夹具的转速; 材料的预熔; 极值点的判别; 蒸发速率的控制; 材料及挡板的自动切换(热蒸发和电子枪, 根据膜系来进行); 控制片的切换及反(透)射的信号强度; 离子轰击的控制(时间和强度); APS 源离子浓度。国外的一些真空设备公司, 如 Leybold, Telemark, Shincron 等, 在七十年代就进行了这方面的工作,

生产的镀膜设备可以对从膜系的设计到薄膜的制备等一系列工序实现自动控制, 并且有很高的控制精度, 如 Leybold 公司的 LEYCOM IV 的监控精度可以达到 0.001%。Shincron 公司在薄膜的控制系统上有 TOP 系统和 DDM 系统。监控精度可以达到 0.01%。但就监控系统而言, Leybold 公司一直处于领先地位, 在光学的极值点判别、厚度的控制、蒸发源电流的控制(控制蒸发速率)、真空室的温度和真空度控制等领域都有成熟的产品。下面介绍一下 Leybold 公司的 OMS-3000 型光度计和 IC/5 系列的石英晶振控制仪的原理。

OMS-3000 光度计

OMS-3000 光度计主要进行光的反透射的测量, 应用于薄膜沉积过程中的实时处理和控制在。对于固定和旋转的监控片都能适用, 监控软件保证在沉积过程中对于膜厚的可靠测量和判别。判别点条件的计算及其一些仪器参数的计算[象放大增益、时间常数等]的最优设置都可以自动执行, 实时 Tigger-point 的校正技术保证较高的生产可重复性和膜厚的判别精度。OMS-3000 中的单色仪由步进马达控制, 再加之异步调制的信号处理技术可以进行绝对反透射率的精确测量。

卤钨灯(光源)发出的光经异步调制被分成时间上分立的参考光和样品光, 异步调制是指参考光和样品光的调制盘上的透光凹槽之间相互错开一段距离, 并共同架在同一个旋转基架上, 以同一个角速度旋转, 这样就在探测器上得到了参考光与样品光错开的电信号, 考虑

*2000 级博士研究生

到探测器本身的暗流, 利用相敏检波技术就可以得到绝对反透射率的表达式:

$$R(T) = \frac{I_{MEA} - I_{BAC}}{I_{REF} - I_{BAC}} * f_{CAL}$$

样品光经调制耦合进光纤, 进入真空室, 射到监控片上, 监控片的反透射光经光纤回到单色

仪上, 另一束为参考光, 不经过真空室, 经光纤与回复的样品光一起进入单色仪分光, 同时交替为探测器所接收, 把样品光与参考光的比值乘以一个校准因子便可得到绝对反透射率之值, 如上式所示。图 1 是 OMS-3000 光度计的原理图:

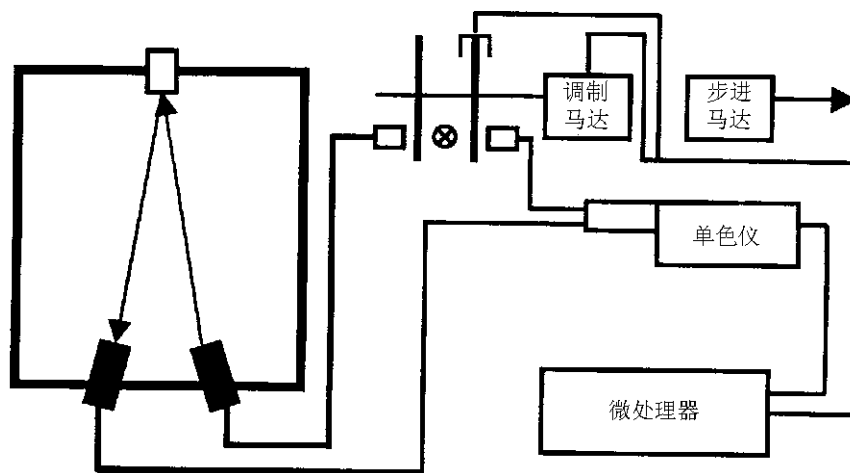


图 1 OMS3000 光度计原理图

IC/5 系列薄膜沉积控制仪

在薄膜的沉积和控制方面, 莱宝公司开发出 IC/5, XTC/2, XTC/C, XTM/2 等一系列的薄膜沉积控制仪, 这些监控仪是利用石英晶振测厚的原理制成的, 采用了 ModeLock 和 CrystalSix

两项专利技术, 可实现薄膜沉积过程中沉积厚度和沉积速率的长期精确的控制, 其石英晶体上单层可沉积厚度最大可达到 $34.3\mu\text{m}$, 控制精度最大为 0.5%, 沉积速率为 $0.006\text{Å}/\text{S}/\text{M}$, 石英晶振控制仪的原理如图 2 所示:

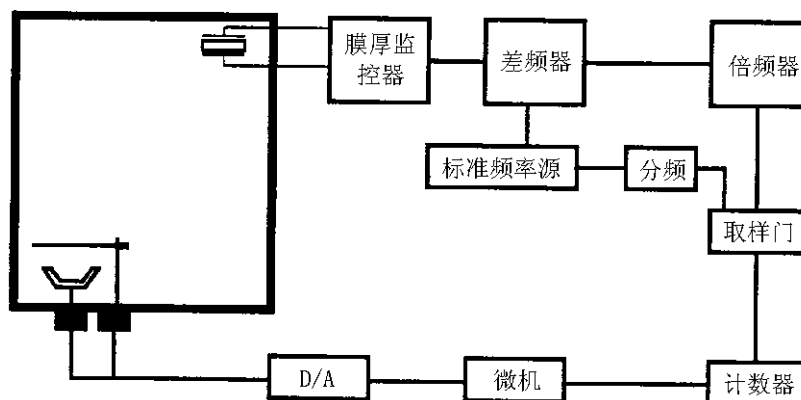


图 2 石英晶体控制仪的频率测量原理图

国外在这方面的技术已经成熟并开始实用, 我国在薄膜制作的控制技术上近年来正进行研究攻关, 图 3 和图 4 分别为西安工业学院和复旦大学研制的光学薄膜厚度监控系统和多

探头薄膜厚度监控系统示意图, 他们通过计算机的串口通信得到光信号或石英晶体振荡的信号, 然后利用计算机作为控制器进行薄膜沉积速率监控和薄膜厚度监控。从国内外发展趋势

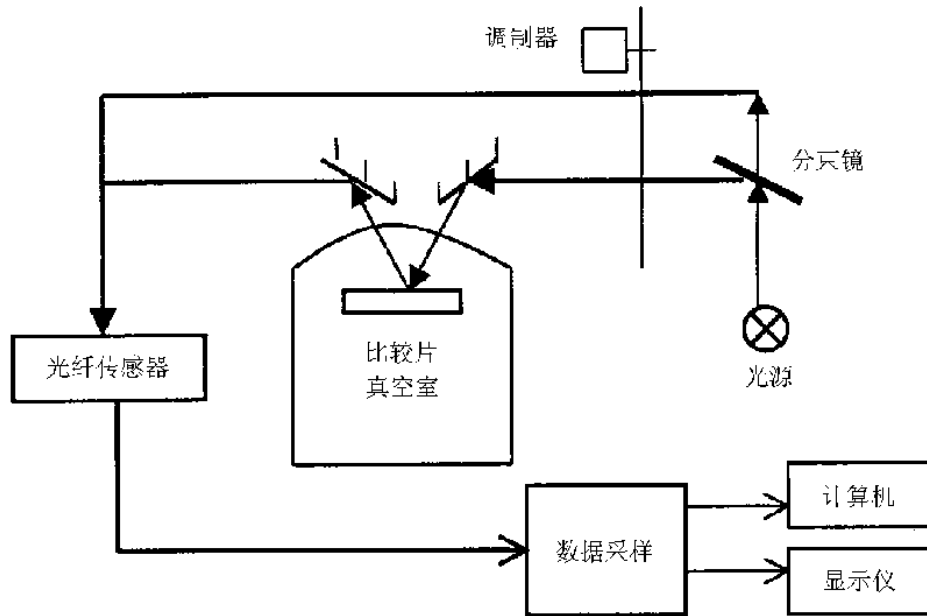


图 3 光学薄膜厚度监控系统示意图

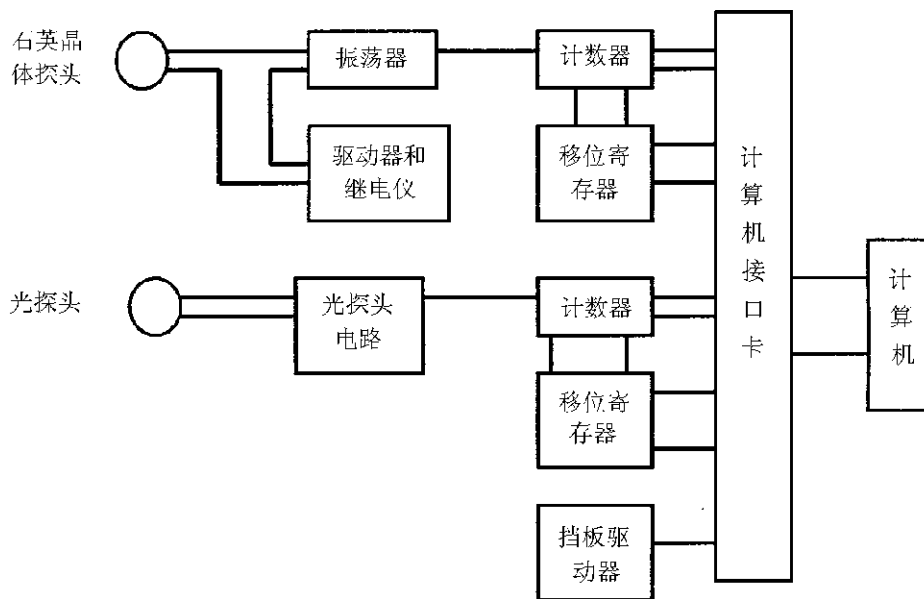


图 4 多探头膜厚监控系统示意图

来看，抗干扰双光路设计、光纤传感器、锁相放大技术和计算机或微控制器控制技术在薄膜制作监控系统中将会起到越来越重要的作用。

3 目前需要解决的问题

在薄膜器件制作过程中，膜厚监控是控制系统中急需解决的问题。目前影响膜厚监控精度的问题主要是以下几个：基片温度、材料的

蒸发特性和沉积速率、真空度以及厚度判别。

3.1 基片温度

首先应该明确的是，镀膜机的真空室里的温度是非均匀和动态变化的。它由蒸发源的温度、烘烤的功率、烘烤基片材料的吸收特性等因素所决定。

真空室里面的温度是由热辐射来传递的。在镀膜过程中，卤钨灯或管状电阻丝加热镀膜

的基片到一定的温度后,基板的温度由于会受到蒸发源的辐射热源的加热而变化,所以,基片的温度不太容易保持恒定。

另外,烘烤的功率对基片温度也有影响。实际中,卤钨灯的烘烤加热,不能达到对支架上的基片都均匀加热。也就是说,加热源的功率分布如何达到对支架上镀膜基片的均匀加热,是一个难题。还有,对于不同的膜系、不同的镀膜材料,如何选择烘烤温度,也是有考究的。有些材料不需要烘烤;有些需要烘烤。有些材料要求在一特定的温度下,才能得到性能优良的光学薄膜。所以,烘烤的功率选择,也很有学问。

在镀膜过程中,基片温度还与基片材料有关。这是由于基片本身吸收烘烤源的辐射热能力不同所致。根据热力学中黑体辐射定律可知,黑体最大辐射所对应的波长,随温度的升高而短移,而且 λ 与 T 的关系有:

$$\lambda \cdot T = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

所以,并不是烘烤加热的温度的升高,基片温度就升高的。每一种基片材料对辐射热的吸收都有一个长波吸收限。这样,对于同样的加热功率,不同材料的基片的温度,会有差别。另外,由于基片厚薄的不同,热容量也不同,对于同样的加热功率,基片的温度升高也不同。一般,薄的基片的温度比厚基片上的温度要高。

3.2 淀积速率

薄膜淀积过程是薄膜材料分子在基板上吸附、迁移、凝结、和解吸的综合平衡过程。淀积速率对膜层的均匀性、膜层的致密性、膜层的机械性能以及光学性能如反射率(透射率)、光的散射吸收等都有影响,淀积速率的快慢会影响膜层极值点的判别的精度。同时对于不同的薄膜材料,其所要求的淀积速率也不同,比如对于一些金属铝膜、银膜要求有尽快的淀积速率,但对于 Au 和 Cr 等的淀积速率就并非重要。同时,淀积速率为了保证薄膜的质量的稳定性往往是与其他因素相互关联的。所以在考

虑到镀膜工艺时应该综合来考虑膜层质量的各个因素,进行优化组合。

3.3 真空度

真空度的影响主要有以下两方面的作用:

1. 气相碰撞使蒸发分子的动能损失; 2. 蒸发分子与残余气体之间的反应。由此可知,残余气体的成分和压强都必须控制。当真空度相当高时,蒸发分子基本上不经过与残余气体的碰撞就可以正常淀积,但当真空度低到一定程度后淀积就发生困难了,比如 ZnS 膜,如在 $10^{-1} Pa$ 以下蒸发 ZnS 膜,膜呈灰白色并趋于不透明,此时,大部分淀积物溅落在蒸发源附近,基板上仅有少量白色粉末,同时影响均匀分布。

3.4 厚度判别

厚度判别一直是整个监控系统的重点和难点,目前通常采用极值点判别。选择监控光信号的波长,通过光信号探测得到随薄膜厚度变化的电信号,然后由计算机判别薄膜厚度是否到极值点,而采样得到的电信号的信噪比限制了膜厚判别的精度,所以必须有一套有效的膜厚控制算法。

4 提出的解决方案及最终目标

结合薄膜工艺的特点及现有的条件,本课题旨在研究出专用于薄膜过程控制的温度控制系统,完善膜厚控制算法,在对薄膜沉积速率和基片温度进行控制的同时提高膜厚判别精度。系统涉及到接口电路板、控制模拟电路板的设计、控制算法的建立、串口通信等内容。

整个系统分为光信号采集模块、速率控制模块、膜厚控制模块、温度控制模块四部分。其中光信号采集模块采集的是监控片上的光反射信号,经光电倍增管转换成电信号再经过锁相放大,滤波处理,转换成 TTL 电平,经 A/D 转换成计算机可以处理的信号,由相应的程序模块进行处理。速率控制模块通过石英晶体振荡来控制,由主机发出控制指令和控制参数。膜厚控制模块是通过采集的信号极值点的判别,来作出蒸发源的切换和挡板的切换。温

度控制模块是通过对五路采样信号实时处理, 得出镀膜机内的温度场分布, 然后以此作出对加热源的反馈量。以上讲的是薄膜监控系统的硬件的实施方案和路线, 关于控制程序的实现主要由以下的几部分组成: 1. 膜厚控制模块。2. 蒸发速率模块。3. 数据采集模块。

总之, 本镀膜监控系统将在整个镀膜过程中完成对膜厚信号的采样、真空室温度与蒸发源蒸发速率的控制、非四分之一膜系转化为四分之一膜系的极值点的判别。本监控系统以生产的可重复性和提高生产效率为目标, 系统成功后, 将使镀膜过程的劳动强度降低, 成品率提升, 生产效率提高。本课题的最终目标: 希望能通过对一些主要参数如温度(环境及真空室的温度)、蒸发速率、极值点的判别和控制, 使薄膜制作在科研、生产过程中有较好的可重复性和稳定性。

参考文献

- [1] H. A. Macleod, Applied Optics Vol. 20, No. 1, 82-89
- [2] V.T. Chitnis, P. N. Puntambekar. Vacuum Vol. 31, 1981, 113-115
- [3] B.Vidal, A.Formier, E. Pelletier, Applied Optics, Vol. 17, No. 7, 1978, 1038-1046
- [4] C Greaves, AinstP, Vacuum, Vol. 20, No.8, 332-338
- [5] Juh Tzeng Lue, Vacuum, Vol. 32, No. 12, 1982, 711-712
- [6] G.Cuttone, D Giove, P Michelato. Vacuum, Vol.38, No8-10, 1980, 727-730.
- [7] K L Hagemans, Vacuum, Vol. 38, 1988, No.711-718.
- [8] J. A. Dobrowolski, Li Li, R. A. Kemp, Applied Optics, Vol.34, No.25, 1995, 5673-5682.
- [9] Brian T. Sullivan, Kari L. Byrt. Applied Optics, Vol.34, No.25, 1995, 5684-5694.
- [10] Rusli, G. A. J. Amaratunga. Applied Optics. Vol.34, No.34, 1995, 7914-7924.
- [11] J. P.Porgogno, B.Lazarides, E. Pelletier, Applied Optics, Vol.21, No.22, 1982, 4020-4029
- [12] Peter H. Berning, Applied Optics, Vol. 22, No.24, 1983, 4127-4141.
- [13] V.T. Bly, J.T.Cox, Applied Optics, 33, 26-30, 1994.
- [14] B. T. Sullivan, J. A. Dobrowolski, Applied Optics, 32, 2351-2360, 1993.
- [15] J. A. Dobrowolski, D. Lowe. Applied Optics, 17, 3039-3050, 1978.
- [16] B. T. Sullivan, K. L.Byrt. Applied Optics, 34, 5684-5694, 1995.
- [17] W. H. Southwell, Applied Optics, 24, 457-460, 1985.
- [18] J. P. Borgogno, E. Pelletier, Thin Solid Films, 34, 357, 1976.
- [19] H. A. Macleod, Opt. Acta 19, 1, 1972.
- [20] P. Giacomo, P. Jacquinet, J. Phys. 13, 59A 1952.
- [21] H. A. Macleod, E. Pelletier, Opt. Acta 27, 907, 1977.
- [22] Ronald R. Willey, Applied Optics, 26 (4), 729-737, 1987.
- [23] W. Klug, M. Boos, R. Herrmann, H. Schwiecker, SPIE 652, 118-123, 1986.
- [24] C. J. V. D. Laan, Applied Optics, 25 (5), 753-757, 1986.
- [25] Zhen Zhu, Whensheng Li, Yuansen Hua, Applied Optics, 24(11), 1693-1695, 1985.
- [26] A. Zoller, R. Herrmann, W. Klug, W. Zultzke, SPIE 652, 21-26, 1986.
- [27] B. Vidal, E. Pelletier, Applied Optics, 18 (22), 3857-3862, 1987.
- [28] Johanner Ebert, Andreas English, SPIE 401, 17-24, 1983.
- [29] R. Herrmann, A. Zoller, SPIE, 401, 83-92, 1983.
- [30] C. Holm, Applied Optics, 18 (12), 1978-1982, 1979.
- [31] Futing Zhao, Applied Optics, 24(20), 3339-3342, 1985.
- [32] Atkinson, P., Nixon, M., IEEE Proc., 131, No. 1, 1 (1984).
- [33] Marquardt, D.W., J. Doc. Ind. Appl. Math., 11, 431 (1963)
- [34] H. A. Macleod, Optica Acta, 19, No. 1, 1 (1972).
- [35] H. A. Macleod, Vacuum 27, 383-390, 1977.
- [36] C. S. Evans, R. Hummeman, J. S. Seeley, A. Whatley, Applied Optics 15,2736-2744, 1976.
- [37] C. Aali, V. Daneu, S. Riva-Danseverino, Optica Acta 27, 1267-1274, 1980.
- [38] 巨养锋, 郭军, 黄钉劲等, 光学薄膜厚度的监控, 西安工业学院学报, Vol. 19, No. 2, 1999
- [39] H. A. Macleod Thin Film Optical Filters Second Edition 1986.
- [40] 唐晋发, 郑权, 应用薄膜光学, 上海科学技术出版社, 1984.
- [41] 冯康等, 数值计算方法, 国防工业出版社, 1978.
- [42] 诸静等, 模糊控制原理与应用, 机械工业出版社, 1995.

[43] 顾培夫, 薄膜技术, 浙江大学出版社, 1990.

[44] 何克忠, 李伟计算机控制系统, 清华大学出版社, 1998.

[45] ALAN V. OPPENHEIM, ALAN S. WILLSKY, S. HAMID NAWAB, 刘树棠译, 信号与系统, 西安交通大学出版社, 1998.

[46] 李友善, 李军, 模糊控制理论及其在过程控制中的应用, 国防工业出版社, 1993.

[47] 唐晋发, 顾培夫, 薄膜光学与技术, 机械工业出版社, 1987

[48] 易仲芳, 80X86 微型计算机原理及应用, 电子工业出版社, 1995

[49] 杨宜禾, 岳敏, 周维真, 红外系统, 国防工业出版社, 1995

[50] 黄遵熹, 单片机原理接口与应用西北工业大学出版社, 1997

[51] 张洪润, 蓝清华, 单片机应用技术教程, 清华大学出版社, 1997

[52] 喻方平, 罗微, MCS-96 系列单片机 PL/M 语言编程及系统的设计与调试, 电子工业出版社, 1997

[53] 潘新民, 王燕芳, 微型计算机控制技术, 人民邮电出版社, 1999

[54] 刘小石, 郑准, 马林伟等, 精通 Visual C++ 6.0, 清华大学出版社, 1999

[55] 何平, 王鸿绪, 模糊控制器的设计及应用, 科学出版社, 1997

[56] 蔡自兴, 智能控制 - 基础与应用, 国防工业出版社, 1998

[57] 孙明轩, 黄宝健, 迭代学习控制, 国防工业出版社, 1999

[58] 赵仕健, Visual C++ 6.0 编程与实例解析, 科学出版社, 2000

[59] 涂时亮, 张友德, 单片机控制技术, 复旦大学出版社, 1994

• 国外专利介绍 •

测定风剖面 and 预测晴空湍流的仪器及方法

美国专利 US6070460

(2000 年 6 月 6 日公布)

了解不同高度的风带和风向对于飞机驾驶员来说是非常重要的, 这有许多理由, 其中两个理由就是可以减少燃料消耗和增加安全性。在巡航高度, 如果驾驶员意识到存在比较有利的风压面并充分利用它, 那么就可以降低飞机的燃料消耗。

然而, 目前还没有能够在飞行期间被动显示飞机前方大气风剖面的有效方法和仪器。采用多普勒激光雷达的主动系统非常昂贵, 而且距离有限。

本发明提供一种能以被动方式测量大气温度的系统。它利用一个被动的方向探测器探测由一团大气气体发出的窄波段能量。所产生的信号可以同一种有效温度联系起来。而该有效温度又可以与一段有效距离联系起来。该系统产生的温度图可以用来计算温度梯度, 而温度梯度又可以用来计算垂直风矢量差, 从而确定是否存在晴空湍流。

本专利文献共 15 页, 其中有 6 张插图。

