

文章编号 1004 924X(2004)03 0335-05

高质量非规整多层膜自动制备的研究

张 泉¹, 苏哲湘², 陈耿晖², 吴长发¹

(1. 华中科技大学 光电子工程系, 湖北 武汉 430074; 2. 福州康顺光通讯有限公司, 福建 福州 350014)

摘要: 为解决专门制备 DWDM 薄膜滤光片的 Leybold APS 1104DWDM 镀膜机制备包含几十层膜层的非规整膜系存在一定困难的问题, 分析了非规整膜系光控曲线中关键区产生的原因, 认为这是触发点位置与非理想环境因素共同作用造成触发点漂移产生的结果。误差校正功能的实现与监控曲线的走值趋势密切相关, 曲线必须存在理论触发点和至少一个拐点。实验结果表明, 采用准规整膜系设计方法能有效避免关键区的危害, 同时充分发挥误差校正的功能。利用该镀膜机在精度、灵敏度和算法等方面的优势, 设计出了与其配套的膜系, 成功地制备了各种高性能薄膜滤光片。

关键词: 多层膜; 莱宝; 非规整膜系; 镀膜机

中图分类号: TB43 文献标识码: A

High performance irregular multi-layer coating machine

ZHANG Quan, SU Zhe xiang, CHEN Geng hui, WU Chang fa

(1. Department of Photoelectron Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074; 2. Koncent Communication Inc., Fuzhou 350014, China)

Abstract: Leybold APS 1104 DWDM is a coating machine specially designed for coating DWDM thin film filter, and it has the difficulty in coating non-QWOT films consisting of multi-decades layers. Through in depth analysis of its characteristics, some design methods are suggested for coating QWOT film. By using these methods, coating high performance thin film filters is finally achieved.

Key words: multi-layer coating; Leybold; irregular series of film; coating machine

1 引 言

经典的薄膜系统, 不管采用几种介质材料, 也不管有多少层数, 它们的厚度是规整的, 即都是 $1/4\lambda$ 或其整数倍厚度, 这在很大程度上是由于传统的解析设计方法都是以各层厚度为 $1/4\lambda$ 或其整数倍为前提的。无疑这种厚度整齐膜系对于制备和监控是方便的。人们试图用规整膜系来设

计其他类型的薄膜滤光片, 如带通滤光片、截止滤光片等^[1], 但结果往往不是指标太单一, 就是膜层数太多、成本太高或者两者兼有。

随着膜系设计软件的发展以及镀膜工艺的不断改进, 非规整膜系已得到广泛的应用, 这不但满足了千变万化的指标要求, 同时也将极大地降低经济成本。就目前而言, 非规整膜系是多种膜片唯一有效的设计途径。虽然非规整膜系理论上可以设计出任何指标的膜系, 但对 DWDM 薄膜滤光

片的设计却并不适合, 因为它的膜系在 100 层以上, 指标极其严格, 对随机误差非常敏感^[2], 0.01% 的随机误差即会完全破坏结果。因此, DWDM 薄膜滤光片必须依靠规整膜系设计, 从误差补偿中获益来达到指标。

Leybold APS 1104 DWDM (简称 1104) 是专为镀制 DWDM 膜片设计的高精密镀膜机。由于系统对膜片指标有严格要求, 因此决定了此镀膜机结构的特殊性, 从而使其制备非规整膜系, 尤其是具有几十层膜层的膜片存在一定的困难。与普通镀膜机相比, 1104 镀膜机在某些方面有其自身的优势。本文的目的在于发现、分析和利用这些优势, 使这种镀膜机镀制高质量多层非规整膜系成为可能。

2 镀膜机特性分析

1104 的一个最大特点是没有专门的监控片, 被镀产品本身也起着监控片的作用, 这意味着在沉积过程中不能更换监控片。对直接控制的研究表明, 窄带滤光片的通带定位是由直接控制本身决定的, 而不取决于个别膜层厚度的记录精度, 但这种补偿仅对一个波长有效, 所以对于诸如宽带增透膜的多层膜系, 特别是制备包含不规整厚度的膜系时, 更合理的是采用分离控制。然而, 对于 1104 镀膜机而言, 情况并非完全如此。DWDM 的精度要求是如此之高, 以至于单凭误差补偿是达不到要求的。

理论上 1104 可以对每一层膜通过更换波长寻找极值触发点来监控, 以达到与镀制 $1/4 \lambda$ 光学厚度(QWOT)膜系等效的目的。但由于 DWDM 膜系全是规整的, 在制备过程中不需要改变波长, 因此 1104 采用了全自动化的过程控制。这意味着光控曲线的拐点及触发点全由光学监控系统(OMS)通过导纳矩阵自动算出, 稍有偏差, 就会造成触发点与极值点分离, 从而使触发点落在危险区域, 不但达不到预期效果, 还有可能破坏整个过程。因此, 在任意厚度膜系监控中常用的更换波长法不能适用。如果使用单波长对任意厚度进行光学监控, 困难在于它不像 QWOT 那样具有误差补偿作用, 要想达到好的监控效果, 必须具备极高的精度以及适当的误差补偿算法。由于 1104 是专为 DWDM 薄膜滤光片设计的, 因此光控精度非

常高。图 1 为 DWDM 膜系间隔层处的光控曲线, 可以看出, 在间隔层(第 16 层)处透过率变化不到

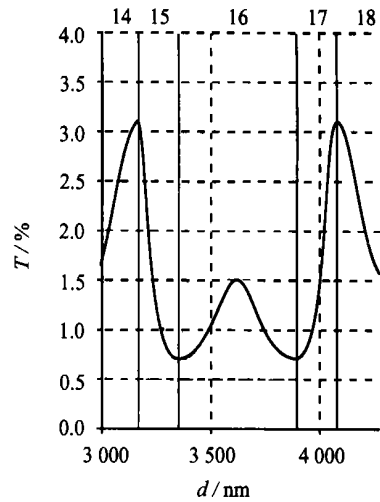


图 1 DWDM 膜系光控曲线
Fig. 1 Optical monitor curve of DWDM coating

1%。将光源信号进行调制与锁相放大后, 信噪比变得非常高。实践表明, 其光控精度达 $\pm 0.05\%$, 完全能满足监控要求。监控曲线触发点的理论值与测量值由于压力、材料、温度等原因会造成一定的偏差, 这种偏差对于 QWOT 膜系来说可以通过走极值的办法来补偿, 而对于非规整膜系, 只能依靠某种算法来校正触发点。光控误差补偿的算法有很多, Hermann^[3], Willey^[4] 等人都对此有深入分析, 1104 使用 Hermann 的线性误差补偿算法。图 2 显示了此校正法的工作原理。这里以反射率为例, 透射率与之类似。图中实线表示沉积过程中反射率随时间变化的实际测量值, 虚线表示理论计算值。触发点校正值计算公式如下:

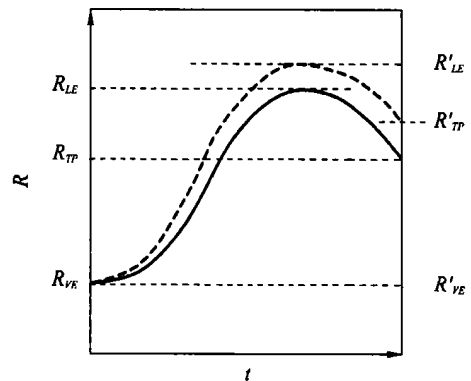


图 2 触发点线性校正
Fig. 2 Linear correction of trigger point

$$R_{TP} = R_{LE} - \frac{R_{LE} - R_{VE}}{R'_{LE} - R'_{VE}}(R'_{LE} - R'_{TP})$$

其中 R_{TP} 与 R'_{TP} 分别表示当前层触发点的反射率测量值与理论值; R_{LE} 与 R'_{LE} 分别表示当前层最后一个极值点处的反射率测量值与理论值; R_{VE} 与 R'_{VE} 分别表示与最后一个极值点相邻的前一个极值点处的反射率测量值与理论值。

图 3 是各种光控曲线的走值趋势图, 这里只列出了起始处为上升趋势的 8 条曲线。如果将起始处为下降趋势的曲线包括在内, 则一共有 16 条。根据 R_{TP} 定义可以知道, 要想得到其值, 必须使 R'_{TP} , R_{LE} , R'_{LE} 存在, 即曲线必须存在理论触发点和至少一个拐点, 显然理论触发点不能与拐点重合, 否则该层的触发方式会变成极值触发。按照以上定义, 发现只有 (4), (6), (7) 项符合要求, 因此在膜系设计时应尽量使每一层的光控曲线与之相符。

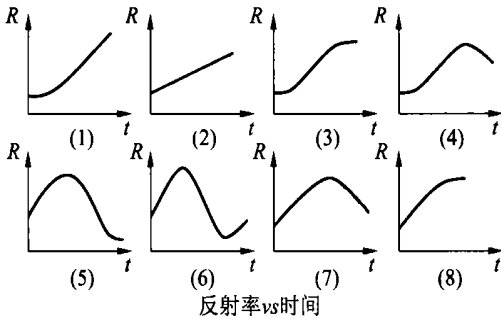


图 3 光控曲线的走值趋势
Fig. 3 Response trend of optical controlled curve

折射率的变化对膜片光谱曲线的影响非常大, 它会造成截止滤光片曲线的漂移, 也会使带通滤光片带宽发生变化。1104 的 APS 等离子辅助沉积技术使膜层极为致密。经过实测, 发现在基底加热至 180 °C, 充氧 35 mL/min 的情况下, 1310 nm 处 Ta_2O_5 膜层的折射高达 2.06。如此高密度保证了膜层折射率的稳定性, 提高了镀膜产品的一致性。然而, 任何条件都不是理想的, 折射率、光强度、真空度以及基底温度等因素在每次镀膜甚至其中的每一层都会发生轻微的变化, 这种变化可能会影响到光学监控的顺利进行。如图 4 所示, 由导纳矩阵求得的透过率会与实际测量值产生偏差, 当触发点靠近极值点时, 会导致测量达不到触发点, 从而使触发点漂移至极值点。通常情况下极值点处信号变化不灵敏, 会造成沉积膜

层偏厚。OMS 能在强度走值的转折点处自动计算当前膜层的折射率, 对当前膜层的沉积触发点进行实时修正。

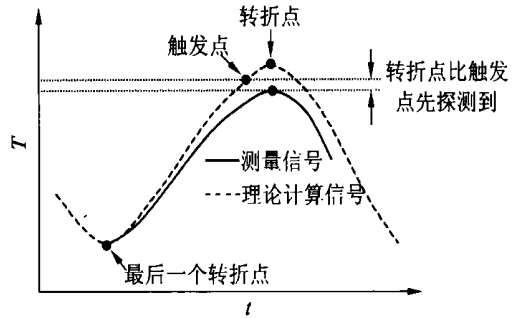


图 4 触发点漂移
Fig. 4 Drift of trigger point

3 膜系设计分析

通过对 1104 的特性分析可以发现, 尽管它的精确度、稳定性等指标都极高, 但对于制备非规整的多层膜而言仍然不够。好的膜系结构有助于充分发挥 1104 的优势, 提高产品的成品率。

DWDM 薄膜滤光片的制备要求监控波长与膜片中心波长重合, 因此 OMS 的监控波长范围落在红外区域。对于普通膜系而言, 这意味着其中的大部分膜层都达不到 1 个 QWOT。为了使 OMS 能在镀膜开始时自动计算材料折射率, 必须使第 1 层存在转折点, 即其光学厚度应大于或等于 $\lambda_M/4$ (λ_M 监控波长)。令设计波长为 λ_D , 则

$$\frac{\lambda_M}{4} = \frac{\lambda_M}{\lambda_D} \cdot \frac{\lambda_D}{4} = k \cdot \frac{\lambda_D}{4}$$

即光学厚度应大于或等于 k 个设计波长处的 QWOT。

尽管 OMS 精度很高, 但为了使光控具有更高的灵敏度, 同时也为了避免可能出现的触发点漂移, 应尽量将触发点落在正弦曲线振幅的 5% ~ 95% 以内。如图 5 所示, 在波峰与波谷的左侧附近 (A 区) 同时具有以上所提到的两种不稳定因素, 在右侧 (B 区) 只存在灵敏度因素, 因此 A 区比 B 区更为关键, 在设计中应尽量避免。

需要注意的是在监控曲线中常会遇到如图 6 所示的情况。第 11 层的触发点按照第 12 层的规律似乎落于敏感的 A 区, 然而情况并非如此。如果增加第 11 层的厚度, 就会发现第 11 层的下一个极值点在 82% 左右, 离触发点有相当的差距,

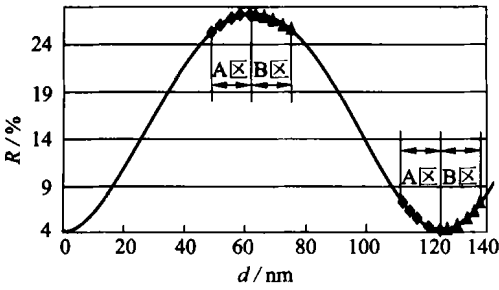


图 5 单层监控曲线
Fig. 5 Optical monitoring curve of single layer

因此第 11 层触发点不位于 A 区, 此设计是可靠的。

一种避免关键区的设计思路是采用准规整膜系, 即膜系具有一致的结构, 但触发点并不在极值处。在设计优化时首先采用规整膜系, 并保持中间膜堆不变, 然后对其两端的几层膜厚进行优化。这样往往能将处于关键区的膜层数减到最少。选择高反射膜系(HL)^mH 作为初始膜系, 对它两端的几层进行优化能派生出截止、带通、双点等各种膜系。最终膜系为: (x₁Hx₂L...x_nH(或L))(HL)^m(或(LH)^m)(y₁H(或L)y₂L(或H)...y_{n'}H(或L)), 根据指标的不同, 可以调整 m 来确定初始层数, 调整两端层数 n、n' 来满足指标。通常 m/n(n') 之值应 ≥5。

有些膜系指标非常特殊, 如激光 YVO₄ 的两点反、一点透膜系, 还有一些膜系要求非常严格。如果按照准规整法设计, 要么增加 m 值, 要么减小 m/n(n') 之比。m 值太大会对成本不利; 而当 m/n(n') 太小, 例如 3 时, 准规整膜系的优势已不明显。这时可以先对全部膜层进行优化, 找出监控曲线中的危险膜层, 通过改变膜厚或监控波长的办法将危险层数降至最少。对于实在避免不了的危险膜层则应在监控中多加留意, 一旦出现膜厚偏差, 则应及时停止或补镀。

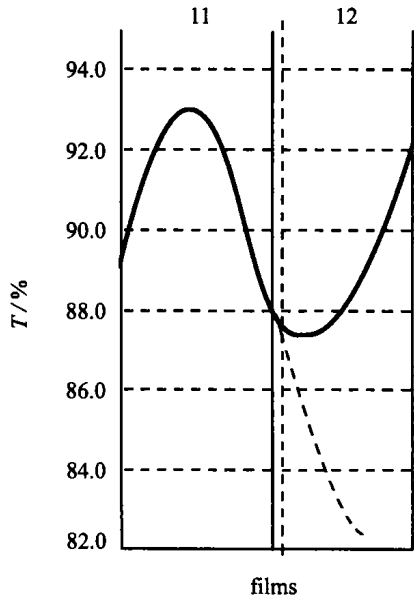


图 6 触发点错觉
Fig. 6 Illusion of trigger point

4 实验结果及分析

选择截止滤光片进行试验, 主要指标为 AR

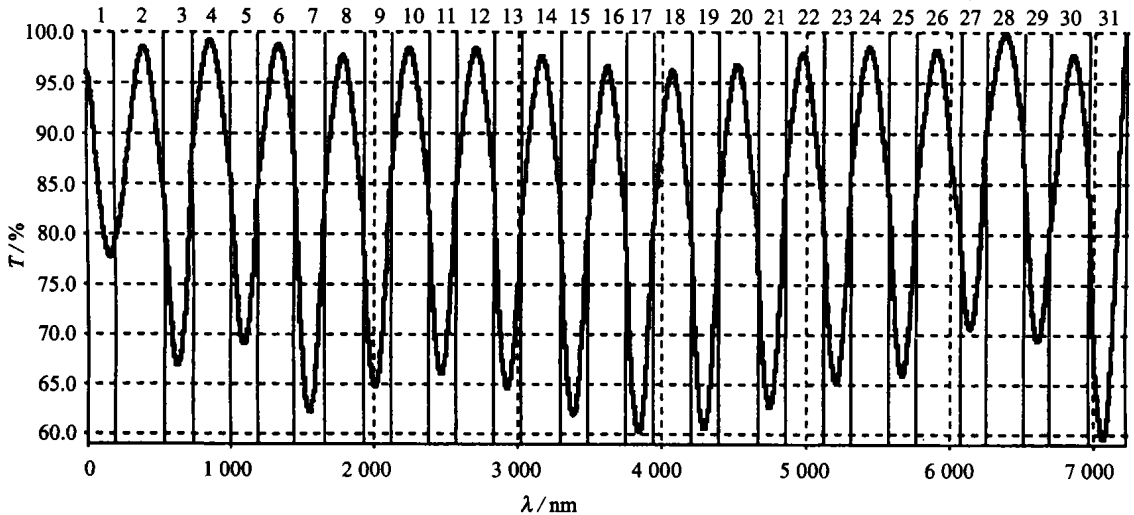


图 7 膜系在 1 310 nm 处的监控曲线
Fig. 7 Optical monitoring curve of the coating at 1 310 nm

@ (1260~1370)&HR@ (1500~1630) nm, 通带透射插入损耗 ≤ 0.4 dB, 反射带透射插入损耗 ≥ 31 dB。膜系完全按要求进行设计, 共有 31 层, 选择监控波长为 1310 nm, 工件盘转速 8% (约 80 r/min)。监控曲线如图 7 所示(未考虑另一个面), 可以看出每 1 层触发点都处于正弦曲线的中部, 具有最大的灵敏度, 而且第 1 层光学厚度也超过了 1 个 QWOT。图 8 为该截止滤光片的透射光谱曲线, 透射带非常平坦, 具有理想的光

谱响应。经实测, 各项指标均达到要求。值得注意的是, 将监控波长设在透射带的中部并没有对透射截止带的边缘形状造成影响^[5]。这表明 1104 对整个波段范围都具有很强的控制能力, 因此同样适于镀制宽波段范围的膜系。这不仅增加了能够镀制的膜片的品种, 而且也为监控波长提供了更多的选择。

5 结 论

实验结果表明, 传统的非规整膜系监控法并不适合于该镀膜机。相反, 利用它在精度、灵敏度、稳定性和算法等方面的优势, 设计出与其配套的膜系, 成功地制备出包含几十层膜层的各式滤光片, 拓展了 Leybold APS 1104 DWDM 的应用领域。与此同时, 与使用普通镀膜机制备的同类产品相比, 由于 1104 使用了 APS 离子源, 增加了膜层的致密度, 因此在环境稳定性、附着力、表面光洁度等方面有着明显的优势。

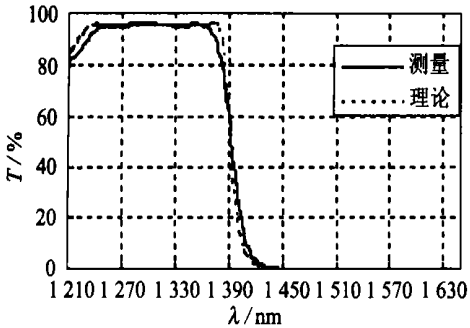


图8 截止滤光片光谱曲线(未镀膜的一面计算在内)

Fig. 8 Spectral curve of edge filter (the opposite uncoated side included)

参考文献:

- [1] 唐晋发, 顾培夫. 薄膜光学与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
TANG J F, GU P F. *Thin film optics and technology* [M]. Beijing: Machine Industry Press, 1987.
- [2] WILLEY R R. Achieving narrow bandpass filter which meet the requirements for DWDM[J]. *Thin Solid Films*, 2001, 398-399 (11): 1-9.
- [3] HERRMANN R, ZOLLER A. Automated optical coating processes[J]. *SPIE*, 1986, 652: 2-9.
- [4] WILLEY R R. Improved repeatability in the production of periodic thin film structures by the use of steering with optical monitoring [C]. *SVC-36st Annual Technical Conference Proceeding*. Albuquerque: Society of Vacuum Coaters, 1993. 156-162.
- [5] ZHAO F. Monitoring of periodic multilayers by the level method[J]. *Appl Opt*, 1985, 24(20): 3339-3342.

作者简介: 张泉(1979-)男, 湖北武汉人, 华中科技大学光电子工程系硕士研究生, 主要研究方向为薄膜设计和薄膜制备。