

文章编号: 1001-3806(2006)03-0313-04

DWDM 窄带滤光片膜层的误差分析与监控策略

李晓平^{1,2}, 易新建^{1*}, 史铁林²

(1. 华中科技大学 光电子工程系, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 微系统研究中心, 武汉 430074)

摘要: 为了提高密集波分复用 (DWDM) 薄膜窄带滤光片制备的成品率, 讨论了用于 DWDM 薄膜窄带滤光片在镀制过程中的监控方法及误差。采用 Monte Carlo 允差分析原理分析用于 DWDM 窄带滤光片膜层的容差, 以便选择更易制备的膜系; 计算膜层的 Macleod 极值灵敏度, 得到所选膜系各个膜层的误差要求; 模拟光学监控过程和计算膜层导纳, 能够得到膜层制备过程中膜层之间膜厚的补偿关系。实验表明, 据此制定的膜厚监控策略, 对于 DWDM 窄带滤光片膜层的制备和保证成品率是非常关键的。

关键词: 光学; 窄带滤光片; 误差与膜厚监控; 密集波分复用

中图分类号: O484.4⁺1 **文献标识码:** A

Error analysis and coating thickness control method for the narrow band DWDM filter

LIXiao-ping^{1,2}, YIXin-jian¹, SHITie-lin²

(1. Department of Opto-Electronics Engineering HUST, Wuhan 430074 China; 2. Institute of Microsystems HUST, Wuhan 430074 China)

Abstract To improve the productivity of fabrication of the narrow band DWDM film filter, the monitoring method and error in coating this film is discussed. Monte Carlo method is used to model the tolerance of the layer for the filter, and the results are used to select the easy coating film system. The film thickness error of each layer is obtained by calculating the Macleod maximum sensitivity. The compensation of the film thickness between each layer is obtained by modeling the optical monitoring processes and the film admittance. The strategy of controlling the film thickness is obtained through the above measures, and the experiments have proved that this is crucial to coating the film for the filter and improving the productivity.

Key words optics; narrow band filter; error and thickness control; dense wavelength division multiplexing (DWDM)

引 言

密集波分复用 (dense wavelength division multiplexing DWDM) 滤光片是薄膜型复用解复用模块的核心元件, 它能够通过极窄光谱范围波长的光, 反射另外一些波长的光。多个滤光片串置起来, 可将不同波长的光耦合进光纤或者从光纤中分解出不同波长的光, 形成复用器与解复用器。与阵列波导光栅和光纤布喇格光栅等复用解复用方式比较, 它以其使用的稳定性成为市场的主流。DWDM 滤光片虽有可靠性很高的专用镀膜机制备其薄膜, 先进离子源保证膜层的致密性, 高速旋转工件盘可使滤光片获得较好的均匀性, 但高精度监控系统的合理使用仍是保证成品率的一个很重要

的工作^[1~4]。合理地监控膜层的光学厚度, 要求对所选膜系进行误差分析, 以制定合理的镀膜工艺。

1 误差分析

1.1 膜系的容差分析

了解所设计膜系的工艺可实施性, 需要知道每层膜厚容许的误差范围, 采取哪种工艺能够满足设计指标; 了解膜层误差的灵敏度, 即在有误差的前提下, 哪几层膜要求苛刻, 计算它的监控曲线, 以便制定膜层镀制的监控策略。下面以 100GHz 滤光片为例说明滤光片技术指标^[5]。由于滤光片膜层有 100 层~200 层, 计算时考虑了两方面的误差: (1) 第 j 层的光学监控误差; (2) 第 j 层前面若干层传递或累积的误差。

根据光学膜层 Monte Carlo 允差分析原理^[6], 对 3 种设计的膜系结构 (见表 1) 分别作了容差分析。3 种设计均采用 Schott 公司的 S7006 玻璃做基板, 因为外层的增透层只和玻璃的折射率有关, 误差分析时没有考虑该层。采用光学极值法监控, 它监控的是探测器上接收的光强, 容差定义为最大容许的光学透过率的

基金项目: 国家“八六三”计划资助项目 (2004AA404043)

作者简介: 李晓平 (1962-), 男, 博士研究生, 现从事薄膜技术方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: yi_jan_ken@yahoo.com

收稿日期: 2005-03-09; 收到修改稿日期: 2005-11-10

误

Table 1 Design for DWDM filter

	design 1	design 2	design 3
structure of filter	(HL) ⁸ H2IH (IH) ⁸ L (HL) ⁸ H6IH (IH) ⁸ L (HL) ⁸ H8IH (IH) ⁸ L (HL) ⁸ H8IH (IH) ⁸ L	(HL) ⁸ H4LH (IH) ⁸ L (HL) ⁸ H6LH (IH) ⁸ L (HL) ⁸ H8LH (IH) ⁸ L (HL) ⁸ H10LH (IH) ⁸ L	(HL) ⁸ H4IH (LH) ⁸ L (HL) ⁸ H6IH (LH) ⁸ L (HL) ⁸ H12IH (LH) ⁸ L (HL) ⁸ H6IH (LH) ⁸ L
band width(0.5dB)		≥0.4nm	
band width(25dB)		≤1.15nm	
number of layer	134	128	140

差。计算容差值时,将光学透过率的误差折合极值数计算,取随机分布,标准偏差为 1.5×10^{-4} ,均值为 0。膜系做 100次模拟,对膜系每次的模拟结果,在需要分析的波段上计算透过率,各个波长处比较每次模拟的透过率,记下透过率的最大值和最小值,输出到文件中;用数学工具软件调用得到的文件,绘出图形得到直观的包络线(见图 1~图 3),实际产品的透过率曲线应落在两条包络线的曲线 1和曲线 2之间。图中统计了全部模拟中数据结果比较好的 75%的模拟结果,它们落在曲线 3和曲线 4的包络线中,选取中间结果(中等性能)的曲线 5它基本与原始设计曲线 6重合。

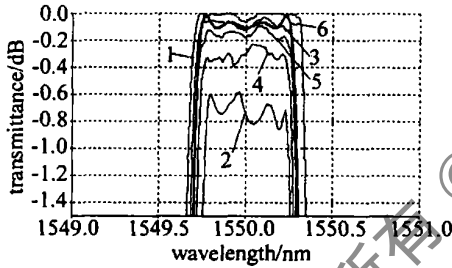


Fig 1 Monte Carlo simulation for design 1

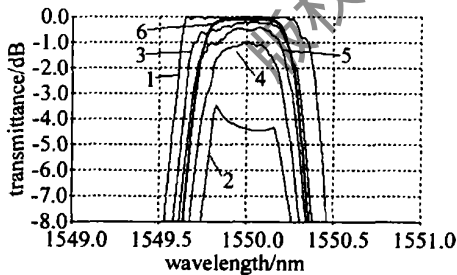


Fig 2 Monte Carlo simulation for design 2

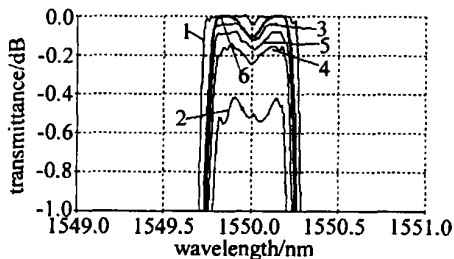


Fig 3 Monte Carlo simulation for design 3

比较图 1,图 2和图 3(见表 2)得出:在这 3种设计中,设计 3的容差最大,设计 1的容差最小,也就是

说设计 3有较高的成品率。

Table 2 Comparison of three types of design

	highest peak/dB	peak in curve 3 and curve 5(1550nm) /dB	original design	result
design 1	0.9	0.18~0.25		good
design 2	4.5	0.5~1.0	curve similitude	bad
design 3	0.6	0.18~0.25		best

1.2 动态灵敏度分析

膜系的灵敏度分析包括考虑误差和不考虑误差两种计算方法。若不考虑误差,可通过计算膜系的总反射率或透过率对每层膜的一阶偏导数得到^[6],对某层膜求导时,假设其它层没有误差。若考虑误差,采用动态 Macleod灵敏度算法计算^[7],获得膜系对各个膜层监控要求的苛刻程度,在误差随机分布条件下,图 4所示为各层膜层的光学厚度,图中横坐标表示膜层的层数,纵坐标数值大小表示各膜层对膜厚监控要求苛刻的不同程度,数值大,对膜厚监控要求苛刻;数值小,对膜厚监控要求的苛刻程度较低。从图中看出:第 18,54,90,124层灵敏度高,数值大,它们都在腔层附近;而腔与腔连接的耦合层附近灵敏度最低,如第 36,72,108层附近。监控时需特别考虑。

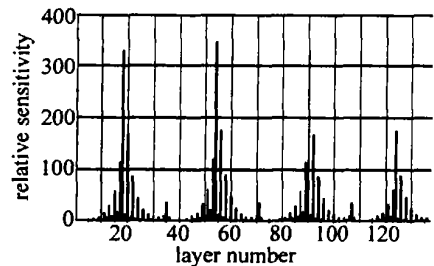


Fig 4 Macleod turning point sensitivity

1.3 薄膜淀积的光学监控过程模拟

(1)计算得出薄膜淀积的工艺过程中透过率随时间变化曲线(见图 5),即极值法光学监控曲线,纵坐标表示透过率,横坐标表示几何厚度及相对应的层数,图中只给出了第 1腔的光学监控计算曲线,第 2,第 3,第 4腔与之类似,这里没有列出。通过这个曲线,能够在薄膜制备前知道工艺过程中透过率监控光各个阶段的

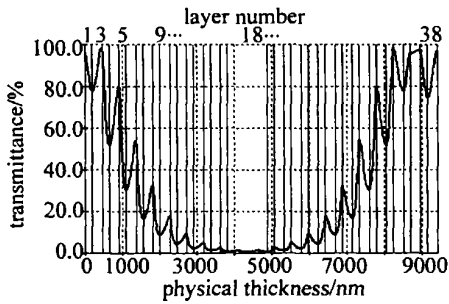


Fig 5 1 layer~ 38 layers optical monitoring curve

变化情形及变化趋势,以保证工艺有较高的成功率。图中显示:腔层(第 18 层)和耦合层(第 36 层)的监控信号变化非常小。这就要求膜系设计者在设计时需考虑膜系能符合设备能够达到的监控精度(如膜系设计时膜系反射层 HL 的对数 ≤ 8 不能大于 8 就是这个原因。工艺工程师和设备商应该努力提高监控精度,使人类不断向新的制造极限冲击)。所以,对于耦合层和腔层,需有特别的监控方法。

(2)直接极值法监控相邻膜层之间的误差补偿方向一般来说是相反的,即前一层偏厚,后一层则偏薄,前一层偏薄,后一层则偏厚。图 6a 是计算的整个膜系的导纳轨迹图中的第 35 层,第 36 层和第 37 层的情况,图 6b 是局部放大图。整个膜系大部分相邻膜层的导纳轨迹都是相反的,但是这个膜系的耦合层周围的一些膜层例外,如第 35 层和第 36 层例外。第 36 层是耦合层。从第 35 层~第 37 层的导纳轨迹图上(见图 6)可以看出,耦合层第 36 层与其第 35 层位于实轴的同侧,因此它们之间无前述的补偿关系,反倒是第 35 层偏厚,第 36 层也偏厚,若第 35 层偏薄,第 36 层也偏薄,即补偿的结果是不但没有减少误差,反而会引入新的误差。第 2 腔和第 3 腔,第 3 腔和第 4 腔之间的耦合层及附近膜层也有同样问题。所以,尽可能减少耦合层的误差,在厚度监控时须独立考虑。

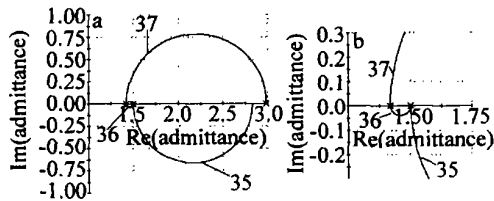


Fig 6 35 layers~ 37 layers admittance diagrams

a—35 layers~ 37 layers admittance diagrams b—local of 35 layers~ 37 layers admittance diagrams

2 监控策略

由于 DWDM 滤光片的膜层大都是规整膜系,光学极值法监控时除耦合层和耦合层的前一层外的各个相邻层之间均有很好的补偿作用^[8],所以,这些层均采用极值法监控, Leybold APS 1104 型光学镀膜机的光

学监控系统的精度能够满足膜层的容差要求。但耦合层和耦合层的前一层之间无补偿作用,如第 35 层和第 36 层等。对于膜厚监控需解决:如何减小耦合层的误差;增加监控信号的强度;考虑监控光信号的带宽^[9 10]。

从理论计算的监控曲线看出:镀膜过程中,第 36 层(耦合层)的强度变化范围在最小值 95.7 到最大值 97.2 之间,这个变化对光学监控来说太小,引起的误差也太大,这个误差不能忽略。虽然从监控灵敏度曲线看,耦合层的灵敏度很小,它的前一层稍大,对光学监控要求也不高。实验发现,若采取石英晶振监控法记录第 33 层 Ta_2O_5 和第 34 层 SiO_2 层的几何厚度,然后,第 35 层 Ta_2O_5 的第 34 层 SiO_2 层用石英晶振监控法监控,这两层的厚度分别与第 33 层 Ta_2O_5 和第 34 层 SiO_2 层的几何厚度相同。这样做的精度要比全部光学极值法监控要高。究其原因:耦合层这里用极值法的监控精度不如石英晶振监控法高,而石英晶振监控法的监控精度约为 2%,若用类似实时的工艺状态以减少误差,加上耦合层本身灵敏度要求较低,这样做应该是合理的,实验也证明了这点。对于第 2 腔和第 3 腔,第 3 腔和第 4 腔之间的耦合层及附近膜层也采取措施。

间隔层的光学监控信号幅度也低,但间隔层的误差灵敏度却相对较高。对间隔层的监控仍采取极值法监控,但为了提高成品率,对设备做了改造,改造方法见后。单波长的光学极值监控系统用于监控除最后 2 层~3 层以外的膜层;为了使滤光片的性能达到最佳,使用扫描法来监控最后 2 层~3 层膜层。

3 监控系统的改进

对于一次成功的窄带滤光片薄膜工艺,减小监控光源带宽是一个关键点。涉及监控光源的因素有 3 个:单色仪的带宽,监控光在测试玻璃上光点的不均匀性,监控光在测试玻璃上的入射角。

从稳定的超窄滤光片镀制工艺的需要,希望得到窄的监控光带宽,实现单波长监控, APS1104 光学镀膜系统配型号不能满足实际需要,为此,对镀膜机的以下部分作了改进:(1)改进了监控光的准直和聚焦单元,改进之后,监控光在测试玻璃的光点直径约 1mm,光入射到测试玻璃的角度几乎是正入射(入射角小于 1°),这样使监控光源的带宽小于 0.3nm;(2)由于监控光带宽的减小,相应的监控光强度也相应减小,极值点的误差也随带宽减小而增大。为此,采取两种方法来减小这种影响,一是将监控光带宽和强度折衷,通过优化计算和多次实验选择合适监控光带宽和强度,二是将监控光源由宽带白光改为一种特殊设计的掺钕的

光纤放大器光源,以增强监控光源的强度。

4 结 果

选用了容差比较大的膜系设计 3 合理的监控方法、设备监控系统的改进使膜厚监控精度提高等,获得了如图 7 所示指标的滤光片,最大插入损耗 (highest peak) 0.37dB,通带内纹波 0.22dB,25dB带宽 1.05nm,0.5dB带宽 0.45nm。测试设备是 HP8164A。

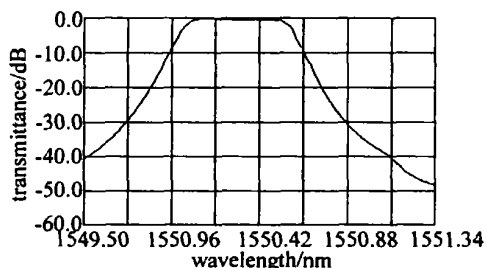


Fig 7 Measured spectrum of DWDM 100GHz for design 3

5 结 论

研究、制定了 DWDM 滤光片膜层一套完整的薄膜误差分析与镀膜过程模拟方法。Monte Carlo 模拟能够得到膜系所要求的膜层厚度控制精度范围,膜系的相对灵敏度分析可以指明每层膜对误差要求的苛刻程度;膜厚光学监控过程模拟能够显示镀膜过程能否完成,膜系的导纳图绘制与分析能够得到极值法监控时膜层之间可能的补偿关系。较完善误差分析方法,对其它光学薄膜的分析有普适意义。

通过以上分析,制定了 DWDM 100GHz 滤光片膜

层制备中膜厚控制策略,膜厚控制是采用一种混合的监控方法:用极值法监控反射层和间隔层;石英晶振法监控耦合层;石英晶振法与光度法结合控制外层的增透层。

参 考 文 献

- [1] M NOWA J, FU JII Y. High performance bandpass filter for WDM transmission [J]. Appl Opt 1984, 23(2): 193~ 194.
- [2] BAUMEISTER P. Application of mirrorwave technology to design an optical multilayer bandpass filter [J]. Appl Opt 2003, 42(13): 2407~ 2414.
- [3] PAN J J, ZHOU F Q, ZHOU M. Thin films improve 50GHz DWDM devices [J]. Laser Focus World 2002 38(5): 111~ 116.
- [4] BAUMEISTER P. Bandpass filters for wavelength division multiplexing-modification of the spectral bandwidth [J]. Appl Opt 1998, 37(7): 6609~ 6614.
- [5] GU P F, BAI Sh Y, LI H F. Design of dwdm thin 2 film interference filters [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(7): 794~ 797 (in Chinese).
- [6] LIN Y Ch, LU W Q. Optical thin-film [M]. Beijing National Defence Industry Press 1990, 336~ 341 (in Chinese).
- [7] TANG J F, ZHENG Q. Applied optics thin-film [M]. Shanghai Shanghai Scientific & Technical Publishers 1984 297~ 300 (in Chinese).
- [8] GU P F. Thin-film technology [M]. Hangzhou Zhejiang University Press 1990, 155~ 165 (in Chinese).
- [9] YANG G, ZHANG X H, CHEN Q M. influence of the monitor light's bandwidth on the coating of narrow-bandwidth filter [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 2001, 29(6): 57~ 59 (in Chinese).
- [10] WANG Y Zh. Effect of error auto-compensation and error of the extremely narrow-band interference filter in DWDM system [J]. Journal of Applied Optics 2004, 25(1): 46~ 51 (in Chinese).
- [11] WANG Y Zh. Effect of error auto-compensation and error of the extremely narrow-band interference filter in DWDM system [J]. Laser 1988, 7(4): 215~ 217 (in Chinese).
- [12] WU F Q, YU D H, LI G H. The design of a parallel beam splitting device with adjustable beam-displacement [J]. Journal of Applied Optics 1993, 14(6): 22~ 24 (in Chinese).
- [13] KONG W J, WU F Q, YUN M J. The ultraviolet band spectrochemical analysis of Iceland crystal material [J]. Laser Technology, 2003, 27(3): 214~ 219 (in Chinese).
- [14] YAO L Y, ZHENG W Ch, GU X M *etal*. Optical material and accessories [M]. Beijing Weapons Industry Press 1995, 1~ 80 (in Chinese).
- [15] WU F Q, XU X P, LI G H. Applied study of optical dielectric film in short-type Galn-Thompson prism [J]. Journal of Qufu Normal University 1995, 21(1): 48~ 51 (in Chinese).
- [16] JIN G F, LI J Zh. Laser metrology [M]. Beijing Science Press 1998 219~ 226 (in Chinese).
- [17] LI G H, WU F Q. The design of the parallel beam splitter [J]. Applied

(上接第 312 页)

3 小 结

理论分析和实验表明:三元结构平行分束偏光镜不仅大大节省了冰洲石晶体材料,还实现了平行偏振光的大剪切差输出;由于光学玻璃和自身结构影响,出射光的消光比不够理想,一般在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 之间。

参 考 文 献

- [1] JIN G F, LI J Zh. Laser metrology [M]. Beijing Science Press 1998 219~ 226 (in Chinese).
- [2] LI G H, WU F Q. The design of the parallel beam splitter [J]. Applied