

文章编号: 0253-2239(2004)02-251-4

膜厚监控系统的光谱宽度对窄带滤光片性能的影响*

顾培夫 陆 巍 陈海星 杨毓铭 李海峰 章岳光 刘 旭 唐晋发
(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 讨论了膜厚监控系统的光谱宽度对波分复用窄带滤光片特性的影响,分析了监控过程中所出现的信号异常现象,其主要原因是控制光光谱宽度以及控制波长与滤光片中心波长不一致,所以控制光光谱分辨率必须小于单个法布里-珀罗滤光片最后 2 层膜折转点波长宽度的一半,即对 100 GHz 的滤光片,监控系统的光谱宽度必须小于 0.2 nm。一旦产生中心波长偏离,就必定产生厚度控制误差。讨论了高折射率膜和低折射率膜的信号变化规律,发现当中心波长比监控波长长时,虽然信号变化规律正确,但判读到极值时的膜厚变薄。中心波长偏离越长,厚度将越薄。而当中心波长比监控波长短时,信号将出现反转。中心波长越短,反转量越大。最后指出了监控误差对滤光片 T_{\max} 和半峰全宽的影响。

关键词: 薄膜光学; 波分复用; 膜厚监控; 光谱宽度; 窄带滤光片
中图分类号: O484 文献标识码: A

Effect of Spectral Width of Thickness-Monitoring System on Performance of Narrow-Band Filters

Gu Peifu Lu Wei Chen Haixing Yang Yumin Li Haifeng Zhang Yueguang
Liu Xu Tang Jinfa

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Hangzhou 310027)

(Received 12 November 2002; revised 23 December 2002)

Abstract: The effect of spectral width of thickness-monitoring system on performance of wavelength division multiplexing (WDM) filters is discussed. Unusual thickness-monitoring signal during deposition is analyzed, which is because of wide spectral width and deviation between monitoring wavelength and central wavelength of the filter. Therefore the spectral width of thickness-monitoring system must be less than half of the turning wavelength width for last two layers of single Fabry-Perot filter. This means that spectral width should be at least less than 0.2 nm for a 100 GHz filter. When the central wavelength is deviated, the thickness error occurs. The signal change regularity for high index and low index materials is shown. When central wavelength is longer than monitoring wavelength, the thickness becomes thinner; and when central wavelength is shorter than monitoring wavelength, the monitoring signal will change in unusual way. These induce a large thickness error, and make maximum transmittance drop and full width at half maximum (FWHM) increase.

Key words: thin film optics; wavelength division multiplexing (WDM); thin film thickness monitoring; spectral width; narrow-band filter

1 引 言

用于光通信的波分复用(WDM)窄带滤光片与常规带通滤光片在光学特性方面的主要差异是通带半峰全宽窄、插入损耗低和中心波长定位精确^[1]。因此,这种滤光片的温度稳定性^[2]、膜厚均匀性^[3]以及

* 高等学校国家重点实验室资助课题。

E-mail: gupeifu@zju.edu.cn

收稿日期:2002-11-11; 收到修改稿日期:2002-12-23

光线入射角度^[4]等要求都极为严格。因而这些特性在很大程度上取决于膜厚监控系统的精度。

用直接透射控制法监控窄带滤光片的膜厚具有较高的波长定位精度已为人们所认识^[5],这主要是因为:1)膜厚误差具有自动补偿的原理;2)没有因新鲜监控片与已镀膜基板之间成膜条件差异引入的误差。

波分复用窄带滤光片的膜厚监控系统主要分为以白光作为光源^[6]和以可调谐半导体激光器作为光源两类。它们各具特点,都可作为实用的波分复用滤光片的膜厚监控系统。由于两类膜厚监控系统产生误差的因素不同,故本文主要讨论用白光光源直接透射控制法的膜厚监控系统光谱宽度对监控精度的影响。随着窄带滤光片最后几层膜的镀制而形成透射峰的过程中,若膜厚监控系统的光谱宽度较宽,则就会导致滤光片的控制信号变化量减小,使厚度监控误差增加,进而使滤光片中心波长与监控波长发生偏离,控制信号出现异常,于是使滤光片的两个反射镜出现严重的不对称性,最终使滤光片峰值透射率下降而半峰全宽增大,中心波长定位精度降低。

光谱宽度引起的膜厚控制误差与膜厚容差分析的随机判断误差是不同的。膜厚容差分析的研究已较成熟^[7],目前已有各种容差分析的软件可供各种膜系的模拟计算,但计算中假定控制光为单色光,不涉及光谱宽度问题。而光谱宽度的影响主要用于窄带滤光片之类的极窄光谱的膜系中,由于目前尚缺乏合理的模型,故本文仅作一些定性分析,但它至少可以对窄带滤光片后反射镜制备时出现的各种异常现象作一解释。

2 监控系统简述

图 1 是用于波分复用窄带滤光片的膜厚监控系统示意图。光源采用高稳定度的高光量卤钨灯,它具有较高的信噪比和稳定性。色散系统选用焦距

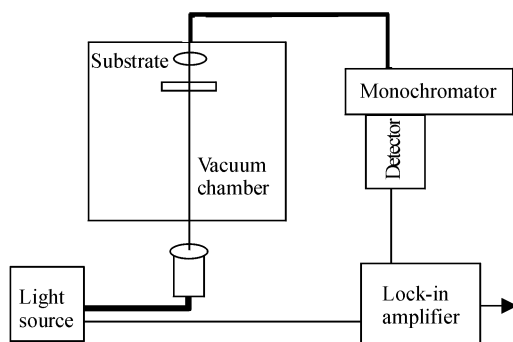


Fig. 1 Sketch of optical monitor

500 mm的高分辨率光栅单色仪,在膜厚监控时的光谱宽度(FWHM)为0.1 nm。接收器采用波长1550 nm高灵敏度的铟镓砷(InGaAs)光电二极管,并配以高稳定度的锁相放大器。该系统实际的动态噪声小于 $\pm 0.01\%$,温漂小于 $0.05\%/h$ ^[2]。

3 控制系统光谱宽度的影响

虽然波分复用窄带滤光片通常是由4个腔或5个腔组成的,但为讨论方便,这里仅以100 GHz滤光片的第一腔为例来说明,即31层膜系:

$$\text{WMS-02} | (\text{HL})^7 \text{H} 6\text{L} \text{H} (\text{LH})^7 | \text{A},$$

其中 $n_{\text{H}}=2.05$, $n_{\text{L}}=1.458$,基板WMS-02在1550 nm的折射率为1.658, $\lambda_0=1550$ nm。为使等效折射率匹配,第一腔的反射堆一般会比第二、三腔少一个HL堆^[1],但它对分析依然有效。

图 2 计算了上述单腔滤光片最后8层膜的信号变化规律。由图可见,随着滤光片最后几层膜的镀制,滤光片波峰逐渐形成,其中第31层相对于第29层半峰全宽明显变窄,但 T_{max} 却比第29层低,这是因为基板WMS-02的折射率较高的缘故。一般认为,在镀制最后3层膜时容易产生控制信号的异常现象,即信号变化幅度明显减少,甚至出现信号反转,本应信号变大,却变小了,反之亦然。至于这种异常现象从哪一层开始,取决于膜厚监控系统的光谱宽度、正在镀制滤光片的半峰全宽和控制时中心波长的偏离等因素。这种异常现象可以用图 2 粗略地加以说明。如果滤光片每层膜的光学厚度控制是准确的,而且监控系统的光谱宽度足够窄,则在镀完第30L后,其透射率值约为81%。当镀制31H时,透射信号将从81%上升到94%。但实际情况是:监控光光谱具有一定宽度,即使在滤光片中心波长与监控波长严格一致的理想情况下,信号变化量也不可能从81%上升至94%,而应该是监控光光谱宽

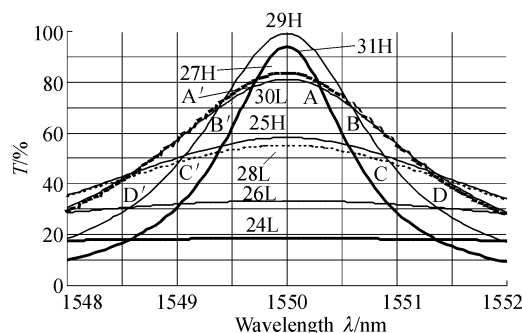


Fig. 2 The signal change of last 8 layers for design:

$$\text{WMS-02} | (\text{HL})^7 \text{H} 6\text{L} \text{H} (\text{LH})^7 | \text{A}$$

度范围内光能量的积分信号变化值。很显然,光谱宽度越宽,信号变化量越小。当光谱宽度超过 A 和 A' 宽度时,由于增大和减小两部分信号的抵消作用,变化量急剧下降,由此产生很大的膜厚监控误差。进而导致滤光片的中心波长偏离监控波长,使信号出现异常现象,而且这种异常现象将随着中心波长和监控波长偏离的增大而加剧。若称 A 或 A' 为信号变化的转折点,则由图 2 可以看出,随着滤光片镀制过程的逐步完成,折转点 D 、 C 、 B 、 A 以及 D' 、 C' 、 B' 、 A' 会越来越靠向中心波长,出现异常现象也会越来越严重。

上述分析表明,膜厚监控系统的光谱宽度是导致滤光片最后几层膜厚控制误差的根本原因,进而膜厚误差导致中心波长偏移,使监控信号随着滤光片的逐渐形成变得越来越异常。这就是用单色激光监控为什么具有极高波长定位精度的解释。从这一点上讲,光谱宽度应是越窄越好,但问题是光强度变得太弱。兼顾两者,取光谱宽度为 $\Delta\lambda/2$ 是允许的,其中 $\Delta\lambda$ 是 AA' 间的波长宽度。对图 2 所示的 31 层滤光片, $\Delta\lambda$ 约为 0.6 nm,即可取光谱宽度 0.3 nm。由于 50 GHz 波分复用滤光片最终要求在 0.5 dB 处的带宽为 0.2 nm,所以文献[3]给出 0.1 nm 的光谱宽度已可以满足 50 GHz 滤光片的要求。

图 3 表示高折射率膜 29H 蒸镀过程中的透射率变化规律。由图 3 可以看出,高折射率膜随着厚度增加,滤光片的峰值波长会先向短波移动,大约在 0.3H 时移到最短波长,移动量可达 0.8 nm,然后逐渐移回长波,当镀完 H 时恰好回到第 28L 所对应的中心波长 1550 nm。很显然,只要中心波长与监控波长不发生偏离,而且光谱宽度小于 $\Delta\lambda/2$,则蒸镀 H 层过程中的峰值波长短移虽会使信号变化量稍有减小但并不影响其极值判读。问题是中心波长偏离常会出现,当滤光片的中心波长位于监控波长的长波侧时,在蒸镀 H 膜层时,信号变化虽符合预示的结果:逐渐增加,但判读到极大值时的厚度会明显偏薄。设监控波长位于图 3 折转点 C' 附近的区域,则对应于极大值的膜厚约为 0.5H。监控波长相对于中心波长更短,膜厚更薄。而当滤光片的中心波长位于监控波长的短波侧时,监控信号会出现反转,即蒸镀 H 层本应透射率上升,却下降了,大约在 0.5H 时才开始上升,当判读到极大值时,厚度已远远超过 H。如果监控波长位于折转点 C 附近,则对应于极大值的膜厚约为 1.5H(图中未示出)。监控波长相对于中心波长越长,膜厚越厚。

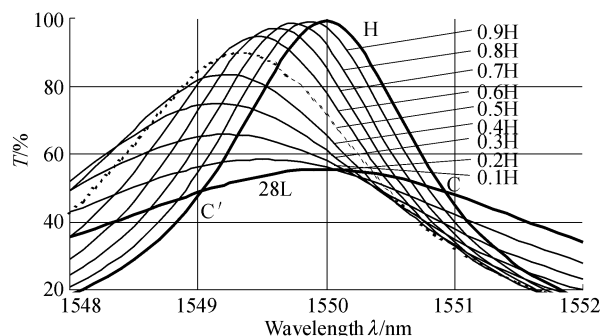


Fig. 3 Signal change of 29H layer during deposition

图 4 表示低折射率膜 30L 蒸镀过程中的透射率变化规律。与高折射率膜相反,随着厚度增加,其峰值波长先向长波移动,大约在 0.6L 后逐渐短移,当镀完 L 时恰好回到第 29H 所对应的中心波长。同样,当滤光片的中心波长位于监控波长的长波侧时,在蒸镀 L 时,信号变化符合预示的结果:逐渐下降,但判读到极小值时的厚度明显偏薄。当监控波长位于图 4 的折转点 B' 附近时,则对应极小值的膜厚约为 0.5L。而当滤光片的中心波长位于监控波长的短波侧时,信号出现反转,即蒸镀 L 层本应透射率下降,但却上升了。设监控波长位于折转点 B ,则大约在 0.5L 时才开始下降,当判读到极小值时,厚度已远远超过 L。

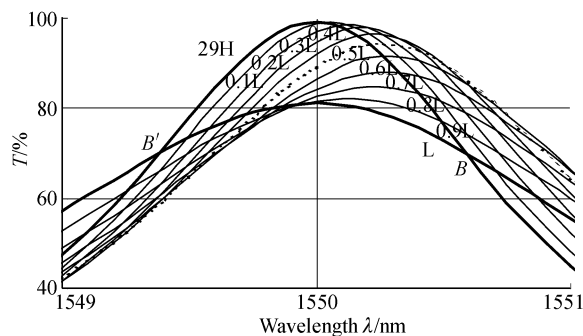


Fig. 4 Signal change of 30L layer during deposition

从上可见,高折射率膜在淀积过程中,滤光片的中心波长会短移,而低折射率膜的中心波长会长移,但无论是 H 还是 L,当中心波长比监控波长长时,信号变化规律正确,判读到极值时的膜厚变薄;而当中心波长比监控波长短时,信号出现反转。这两种情况均造成很大的监控误差。

4 光谱宽度引起的膜厚误差对滤光片特性的影响

在滤光片设计时,两个反射堆是严格对称的,但

在淀积过程中,由于每个法布里-珀罗腔的最后几层膜监控误差很大,致使两个反射膜的反射率不等。为了估计两个反射膜的不对称性对 T_{\max} 的影响,设 $R_2 = R_1 - \Delta$, Δ 即为两反射膜的反射率之差,故 $T_2 = T_1 + \Delta$,则可得到 T_{\max} 的表达式^[9]:

$$T_{\max} = \frac{T_1^2}{(1-R_1)^2} \frac{1+\Delta/T_1}{(1+\Delta/2T_1)^2}$$

上式第一部分是两个反射堆没有不对称误差时的峰值透射率,而第二部分表明不对称误差的影响。可以知道,不对称误差使滤光片的峰值透射率下降。

Table 1 Effect of unsymmetry on T_{\max} and $\Delta\lambda$

| Design | R / (%) | T / (%) | $T_{\max} / (\%)$ | | | $\Delta\lambda / \text{nm}$ | | |
|---------------------|---------|---------|-------------------|----------------|--------------|-----------------------------|----------------|--------------|
| | | | $\Delta=0$ | $\Delta=0.5\%$ | $\Delta=1\%$ | $\Delta=0$ | $\Delta=0.5\%$ | $\Delta=1\%$ |
| (HL) ⁷ H | 98.67 | 1.33 | 1 | 0.975 | 0.925 | 2.20 | 2.62 | 3.04 |
| (HL) ⁸ H | 99.33 | 0.67 | 1 | 0.926 | 0.817 | 1.11 | 1.52 | 1.94 |

结论 膜厚监控系统的光谱宽度对宽带膜系的影响很小,但对窄带滤光片的监控误差产生重要的影响,它使滤光片中心波长与监控波长产生分离,从而导致滤光片最后几层膜的膜厚判读不足或甚至信号反转,所以光谱分辨力必须小于滤光片最后 2 层折转点波长宽度的一半。对 100 GHz 的波分复用滤光片,由于其 0.5 dB 的带宽为 0.4 nm,所以监控系统的光谱宽度应小于 0.2 nm。

高折射率膜在淀积过程中,滤光片的中心波长短移,而低折射率膜的中心波长长移,但无论是高折射率膜还是低折射率膜,当中心波长比监控波长长时,信号变化规律正确,判读到极值时的膜厚变薄。在控制过程中,若膜层淀积速率基本不变,但蒸发时间减少,则暗示滤光片的中心波长已偏长。若信号出现反转,则可能是中心波长已偏短。这两种情况均造成很大的监控误差。最终使 T_{\max} 下降,半峰全宽增大。

参 考 文 献

- 1 Gu Peifu, Bai Shengyuan, Li Haifeng *et al.*. Design of DWDM thin-film interference filters. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7):794~797 (in Chinese)
- 2 Gu Peifu, Chen Haixing, Lu Wei *et al.*. Temperature stability of the central wavelength for WDM thin film

随着 T_{\max} 的降低,半峰全宽则随之增大。对波分复用滤光片,反射堆不对称时的半峰全宽 $\Delta\lambda$ 可表示成^[10]

$$\Delta\lambda = \frac{1-R_1+\Delta/2}{m\pi\sqrt{R_1-\Delta/2}}\lambda_0$$

基于上述公式,计算得到的不对称性 Δ 对 T_{\max} 和半峰全宽 $\Delta\lambda$ 的影响列于表 1。计算中,取 $n_H = 2.05$, $n_L = 1.458$, $m = 3$, $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 。从表可见,当 $\Delta > 0.5\%$ 时,特性已明显下降。

bandpass filters. *Acta Optica Sinica* (光学学报), to be published (in Chinese)

- 3 Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yueguang *et al.*. Uniformity of layer thickness of DWDM filters prepared by ion-beam sputtering and ion-assisted deposition. *Optical Technique* (光学技术), 2001, **27**(5):410~412 (in Chinese)
- 4 Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yueguang *et al.*. Characteristics and improvement of dense wavelength division multiplexing thin film filters used in tilted incidence. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(3):377~380 (in Chinese)
- 5 Zhou Jiulin, Yin Shubai. *Optical Thin Film Technology* (光学薄膜技术). Beijing: National Defence Industry Publishing House, 1974. 318~345 (in Chinese)
- 6 Son Daiyu, Kazuo K, Cai Xuyang *et al.*. Hi-precision optical thickness monitor applied to manufacture of ultra narrow band pass filter. *Optical Instruments* (光学仪器), 1999, **21**(4~5):130~136 (in Chinese)
- 7 Macleod H A. The effect of errors in the optical monitoring of narrow-band all dielectric thin film optical filters. *Optica Acta*, 1974, **21**(6):429~443
- 8 Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yueguang *et al.*. Refractive indexes of oxidized thin films deposited by ion beam sputtering. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(3):290~293 (in Chinese)
- 9 Tang Jinfa, Zhen Quan. *Applied Thin-Film Optics* (应用薄膜光学). Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 1983. 249 (in Chinese)
- 10 Lee C C. *Thin-Film Optics and Coating Technology* (薄膜光学与镀膜技术). 2nd ed., Taipei: Yi Hsien Publishing Company, 2001. 208~209 (in Chinese)