

文章编号: 0253-2239(2005)01-105-4

多腔薄膜梳状滤波器中心波长温度稳定性分析

陈海星 顾培夫 李海峰 章岳光 吕玮阁 金波

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 利用高桥模型详细分析了多腔薄膜梳状滤波器的中心波长温度稳定性问题。发现由于多腔薄膜梳状滤波器的固体腔较厚而反射镜膜系的厚度相对较薄,因此膜系与固体腔之间的温度引起的弹性应力导致的膜系光学常数的变化已经不是主要影响因素,而固体腔材料的折射率温度系数引起的中心波长漂移对整个器件的影响较大。计算表明对于一个密集波分复用中使用的 100 G 信道间隔的三腔薄膜梳状滤波器而言,当固体腔材料(熔融石英)的折射率温度系数为 $1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 时,器件的中心波长漂移在 $-40^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ 的温度范围内可达 $\pm 1 \text{ nm}$ 。

关键词: 薄膜光学; 梳状滤波器; 高桥模型; 温度稳定性

中图分类号: O484.4 文献标识码: A

Analysis of the Temperature Stability of Center Wavelength for the Thin Film Interleaver with Multicavity

Chen Haixing Gu Peifu Li Haifeng Zhang Yueguang Lü Weige Jin Bo

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

Abstract: The analysis on the temperature stability of center wavelength for the thin film interleaver with multicavity by Takahashi model is presented. It is found that the change of optical constant caused by the interactional elastic force between the reflector thin film stack and the cavity with the temperature change is not the main reason affecting the shift of center wavelength of the device, however, the temperature coefficient of the refractive index of cavity material is the important factor. The simulated calculation showed that the total shift of the device with the temperature vibration from -40°C to 85°C would reach $\pm 1 \text{ nm}$ or so for a three-cavity thin film interleaver used in dense wavelength division multiplexer (DWDM) with 100 G channel interval.

Key words: thin film optics; interleaver; Takahashi model; temperature stability

1 引 言

梳状滤波器是密集波分复用光通信系统中重要的器件之一^[1]。利用成熟的薄膜沉积工艺制作的多腔薄膜梳状滤波器具有结构简单、制作容易、插入损耗小等特点^[2]。但是实际使用时,由于环境的温度变化影响,器件中材料的折射率温度系数变化以及温度产生的应力等问题将导致整个器件的中心波长发生偏移。因此,对于温度引起这种中心波长偏移的分析是十分必要的,它将直接影响到器件的使用。

高桥^[3]在 1995 年提出了一个模型用来分析薄膜窄带滤光片的温度稳定性问题,指出了基板与膜层之

间的线膨胀系数的失配是导致滤光片中心波长偏移的主要原因。通过建立模型分析表明,对于基板的线膨胀系数从 $0 \sim 142 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ 变化时,滤光片的中心波长漂移从 $0.018 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 变化到 $-0.005 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。一些研究者利用高桥模型对薄膜滤光片的温度稳定性进行了分析^[4,5],理论和实验的结果吻合得较好。本文使用这个模型对多腔薄膜梳状滤波器的温度稳定性进行了分析,结果表明对于多腔薄膜梳状滤波器,由于腔材料的厚度与其上沉积的薄膜厚度相差悬殊,由线膨胀系数失配产生的形变而导致中心波长随温度漂移已经不是主要的因素;而作为间隔层的熔融石英,其线膨胀系数几乎为零^[4],因而固体腔材料的折

作者简介: 陈海星 (1976~),男,江西临川人,博士生,主要从事基于光学薄膜的光学滤波器设计和制作研究。

E-mail: seastarchen@yahoo.com.cn.

收稿日期:2003-12-15;收到修改稿日期:2004-05-14

射率温度系数引起的折射率变化上升为主要因素。这种影响在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内可引起器件的中心波长漂移达到近 $\pm 1\text{ nm}$,这对于密集波分复用中使用的100 G信道间隔的梳状滤波器而言已经不能完全使用了。

2 原 理

一个简单的由三个固体腔组成的薄膜梳状滤波器如图1所示。固体腔的材料为熔融石英^[2],第一个腔的两面都镀上反射镜,第二、第三个固体腔都是单面镀反射镜,反射镜的高低折射率材料分别为 Ta_2O_5 和 SiO_2 。然后,通过光学胶合的方法将三个固体腔固定在一起,这便是薄膜固体腔梳状滤波器的简略制备过程。从器件的结构特点可以知道,当环境温度发生变化时,由于固体腔的材料与反射镜膜系材料的折射率温度系数和线膨胀系数不同,腔和反射镜的等效光学厚度都会发生变化,从而使得整个器件的透射光谱改变,最明显的是中心波长发生漂移。

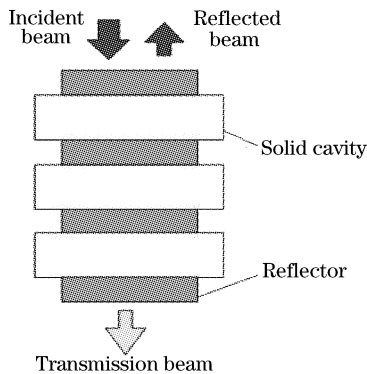


图1 多腔薄膜梳状滤波器结构简图

Fig.1 Schematic diagram of multi-cavity thin film interlayer

为了采用高桥模型来分析器件的中心波长的温度稳定性,我们假设三个腔受温度变化引起的效应是一致的,同时将固体腔看成是由多层相同材料(熔融石英)的四分之一波长膜层组成。通过分析其中一个腔与其上沉积的反射镜膜系之间的相互作用以及各自折射率随温度变化的影响,就可以得到整个器件的中心波长的漂移量与温度之间的关系。

根据高桥模型,对于基板与膜系组成的系统,当温度发生变化时,由于基板和膜系各自的线膨胀系数的不同,它们之间将发生相互作用,从而导致实际膜系的物理厚度发生变化,进而影响到整个膜系的光学特性。根据弹性形变方程,由于温度引起的 x, y, z 方向的弹性膨胀量可以表示为^[3]

$$\begin{cases} L_x = L_0(1 + t_{xx}/E)(1 - s \cdot t_{yy}/E), \\ L_y = L_0(1 + t_{yy}/E)(1 - s \cdot t_{xx}/E), \\ L_z = L_0(1 - s \cdot t_{xx}/E)(1 - s \cdot t_{yy}/E), \end{cases} \quad (1)$$

式中 E 为杨氏模量, s 为泊松比; L_0 为膜系在温度 T_0 时立方体积 V_0 的边长。 t_{xx}, t_{yy} 分别表示 x, y 方向的热应力。通过适当简化并考虑到膜系本身的线膨胀,可以得到膜系在温度 T 时的体积为

$$V_T = L_x L_y L_z = V_0 \left[1 + \frac{2(\alpha + \beta)(1 - 2s)}{1 - s} + 3\beta \right], \quad (2)$$

α 和 β 分别为基板和膜系的线膨胀系数。根据聚集密度的定义,由(2)式得到膜系在温度 T 时的聚集密度为

$$P_T = P_0(1 + 3\beta)/(1 + 3\beta + A), \quad (3)$$

其中 $A = 2(\alpha - \beta)(1 - 2s)/(1 - s)$, P_0 为膜系在 T_0 温度时的平均聚集密度。膜系在温度 T 时的几何厚度可表示为

$$d_T = d_0(1 - B + \beta), \quad (4)$$

式中 $B = 2s(\alpha - \beta)/(1 - s)$, d_0 为温度 T_0 时的几何厚度。同时,温度 T 时的折射率为

$$n_T = N_T P_T + 1 - P_T = (N_0 + N_0 \delta) P_T + 1 - P_T, \quad (5)$$

这里 N_0, N_T 分别为温度 T_0 和 T 时膜系的有效折射率。

由上面的推导过程,我们可以得到中心波长稳定性的表达式

$$S_{CW} = \lambda [N_T d_T / (N_0 d_0) - 1]. \quad (6)$$

从上述过程中可以看到温度的变化从两个方面改变了膜系的光学常数:1) 折射率的变化。由于聚集密度的变化,实际膜系的有效折射率发生了变化,同时由于材料的折射率温度系数也会使得膜系的折射率发生变化。2) 几何厚度的变化。由于膜系本身的线膨胀以及和基板的相互作用,使得膜系的实际几何厚度发生了变化。这两方面的作用导致了膜系的光学厚度改变。

上述分析是基于窄带薄膜滤光片进行的,对于薄膜固体腔型梳状滤波器情况,固体腔的厚度近1 mm(信道间隔为100 G时),相比较而言,反射镜膜系的几何厚度很小(中心波长1550 nm时,7层反射镜膜系的厚度约为 $1.55\text{ }\mu\text{m}$),对固体腔的影响很微小。从以上推导过程可以知道,对温度 T 为时的膜系有效折射率 N_0 的计算时,是将整个膜系看成一个力学结构来分析,因此实际上是求膜系的平均折射率。区别于文献[3]所述,我们采用以下公式以符合实际

情况

$$N_0 = \sum_{i=1}^n n_i d_i / \left(\sum_{i=1}^n d_i \right), \quad (7)$$

其中 n_i 为第 i 层膜的折射率, d_i 为第 i 层膜的物理厚度。在高桥模型中, 主要分析了温度变化导致的膜系光学常数变化, 因而对基板主要考虑的是其线膨胀系数与膜系材料的线膨胀系数不同而引起的弹性应力作用而不需考虑基板的温度折射率系数引起的变化, 因为基板此时仅相当于一个衬底。但对于多腔薄膜梳状滤波器而言, 模型中的“基板”(即固体腔)是薄膜滤波器的重要组成部分, 同时其厚度较反射镜膜系的厚度大很多。因此, 当温度变化时, 固体腔与膜系之间的弹性应力作用导致的固体腔几何厚度变化较小, 固体腔自身的折射率温度系数引起光学厚度变化则必须加以考虑。

固体腔的折射率温度系数引起器件中心波长漂移可以用下式表示:

$$\Delta\lambda = \lambda_0 \left(\frac{\delta n}{\delta T} + \frac{\delta d}{\delta T} \right) \Delta T, \quad (8)$$

其中 λ_0 为温度为 T_0 时的中心波长, $\delta n / \delta T$ 为固体腔材料的折射率温度系数, $\delta d / \delta T$ 为固体腔的线膨胀系数, ΔT 为温度的变化量。由于固体腔材料为熔融石英, 其线膨胀系数为 $5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$, 远小于折射率温度系数 $1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ^[6], 因而可以忽略不计, 则(8)式可以简化为

$$\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{\delta n}{\delta T} \Delta T. \quad (9)$$

3 分析与计算

计算中, 我们以三个固体腔组成的薄膜梳状滤波器作为例子, 其结构为: LHLH | Cavity | HLHLH | Cavity | HLHLH | Cavity | HLHLH。固体腔的材料为熔融石英, 折射率为 1.458。折射率温度系数取 20°C 时的线性拟合平均值为 $1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, 线膨胀系数为 $5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$, 泊松比取 0.12^[6]。由于实际使用时对梳状滤波器的中心波长温漂要求很严格, 因此在温度所允许变化的范围内, 所取的折射率温度系数可看成常量。反射镜膜系材料为 $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$, 折射率分别为 2.05 和 1.458^[7]。由于在三个固体腔中必然有一个固体腔的两面都镀有膜系, 对这个固体腔而言, 在温度变化时两面的膜系相差不大, 由此产生的相互应力可以抵消, 因而计算中取单面膜系为 HLHLH 的固体腔作为分析对象。室温为 20°C , 根据上述参量以及(7)式和(8)式, 得到的计算结果如图 2、图 3 所示,

温度变化范围从 $-40 \sim 85^\circ\text{C}$ 。

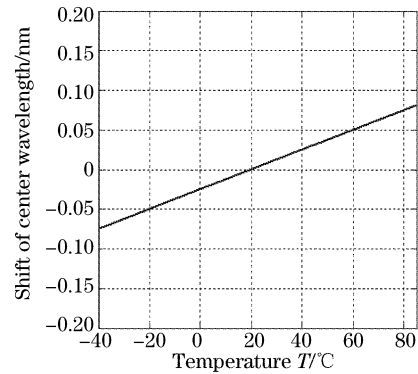


图 2 根据高桥模型得到的中心波长漂移
Fig. 2 Shift of center wavelength according to Takashashi model

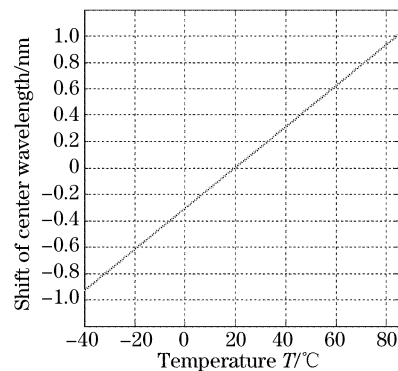


图 3 腔体材料折射率温度系数引起的中心波长漂移
Fig. 3 Shift of center wavelength caused by temperature coefficient of refractive index of the cavity

由图 2 可以看到, 根据高桥模型计算得到的曲线反映了膜系与固体腔之间的弹性应力相互作用和膜系本身的折射率温度系数引起的光学厚度的变化。这种变化在固体腔型的薄膜梳状滤波器中是非常小的。计算表明从 $-40 \sim 85^\circ\text{C}$ 的温度变化范围, 中心波长的漂移量约为 $\pm 0.08 \text{ nm}$ 。这是由于膜系与固体腔相互之间的弹性应力作用导致膜系的几何厚度变化部分抵消了膜系材料的折射率温度系数引起的光学厚度变化, 因而中心波长的漂移很小。

图 3 显示了根据(8)式计算的固体腔材料本身的折射率温度系数引起的波长漂移情况。可以看出, 在固体型薄膜梳状滤波器这种器件中, 由腔的材料折射率温度系数引起的中心波长漂移是比较大的。因为这种情况下, 固体腔受到膜系弹性应力作用发生变形而产生的几何厚度变化完全可以忽略, 主要的影响就是固体腔材料本身的折射率温度系数引起的折射率变化。图中显示这种变化导致的中心波长漂移最大可达到 1 nm 左右, 比图 2 中的波长漂

移大了一个数量级,这说明了对于多腔薄膜梳状滤波器结构,固体腔的材料折射率随温度发生变化是整个器件中心波长漂移的主要因素。同时这种变化也导致了固体腔的光学厚度微小变化,由于相对变化量太小,根据法布里-珀罗腔原理我们知道这种影响对器件的光谱形状基本上没有任何改变,仅使中心波长发生漂移。对于整个器件而言,实际的中心波长漂移应该是图 2 和图 3 显示的漂移量总和。

4 结 论

从高桥模型的原理出发,我们分析了多腔薄膜梳状滤波器的中心波长稳定性的问题。不同于高桥分析的窄带薄膜滤光片的情况,由于固体腔薄膜梳状滤波器的固体腔较厚,因而沉积其上的膜系与固体腔之间的温度引起的弹性应力作用对整个器件的中心波长漂移不再起主要作用,而固体腔材料本身的折射率温度系数上升为主要因素。实际计算得到的结果表明,在一般情况下,间隔层材料(熔融石英)的折射率温度系数为 $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 时,这种因素导致的中心波长的漂移可达 1 nm 左右。对于密集波分复用中使用的多腔薄膜梳状滤波器,信道间隔非常密集,因此必须考虑到这种温度对中心波长稳定性的影响。若对于 100 G 梳状滤波器的通带中心波长的允许偏移量为 ± 0.1 nm,则根据本文的分析计算

可知,此时对器件的使用环境温度范围的要求为 $14 \sim 26$ $^{\circ}\text{C}$ (室温为 20 $^{\circ}\text{C}$),一般情况下就需使用温控器件以保证薄膜梳状滤波器的中心波长温度稳定性。

参 考 文 献

- 1 Haixing Chen, Peifu Gu, Yueguang Zhang *et al.*. Optical interleaver based on multi-cavity Fabry-Pérot thin film filter [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4906**: 561~566
- 2 Chen Haixing, Gu Peifu, Li Haifeng *et al.*. Design of interleaver with cascaded thin film filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24** (1): 62~64 (in Chinese)
陈海星,顾培夫,李海峰等. 薄膜多腔滤光片型梳状滤波器的设计[J]. 光学学报, 2004, **24**(1): 62~64
- 3 H. Takahashi. Temperature stability of thin-film narrow-bandpass filters produced by ion-assisted deposition [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(4): 667~675
- 4 Gu Peifu, Chen Haixing, Lu Wei *et al.*. Temperature stability of the center wavelength for WDM thin film bandpass filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 33~36 (in Chinese)
顾培夫,陈海星,陆巍等. 波分复用薄膜带通滤光片的中心波长温度稳定性[J]. 光学学报, 2004, **24**(1): 33~36
- 5 R. Parmentier, M. Lequime. Substrate-stain-induced tenability of dense wavelength-division multiplexing thin-film filters [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(9): 728~730
- 6 M. Bass, E. W. V. Stryland, W. I. Wolfe *et al.*. *Handbook of Optics* [M], New York: McGraw-Hill, 1976
- 7 Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yueguang *et al.*. Refractive indexes of Oxidized thin film deposited by ion beam sputtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 290~293 (in Chinese)
顾培夫,李海峰,章岳光等. 用离子束溅射淀积的氧化物薄膜的折射率[J]. 光学学报, 2002, **22**(3): 290~293