

文章编号: 0253-2239(2006)04-0625-5

随机生长误差对双腔型平顶法布里-珀罗 滤波器的影响*

蔡 晓 左玉华** 毛容伟 王启明

(中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 在光网络中平顶滤波器可以有效地提高信道光检测的快速性和准确性。利用两个法布里-珀罗腔间的串联耦合, 可以构建出具有平顶透射特性的双腔型法布里-珀罗滤波器。采用传输矩阵的方法, 研究了随机生长误差对双腔型平顶滤波器透射特性的影响。模拟分析表明, 当两个法布里-珀罗腔的物理厚度差超过一个纳米时, 在透射谱中就会出现两个高度不同的透射峰; 解释了实测器件的透射谱中的双峰不对称性; 用界面起伏的概念解释了实测滤波器带宽大于理论值的原因。理论分析与实验结果取得了较好的一致。

关键词: 光学器件; 平顶滤波器; 法布里-珀罗腔; 双半波腔; 传输矩阵

中图分类号: TN713 文献标识码: A

Effect of Random Growth Error on Double Half-Wave Fabry-Pérot Filter with Flat-Top Response

Cai Xiao Zuo Yuhua Mao Rongwei Wang Qiming

(State Key Laboratory of Joint Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Abstract: In the optical network, a filter with flat-top response can complete the quick and accurate channel optical detection with wavelength. With two Fabry-Pérot cavities coupled in series, a double half-wave filter with flat-top transmission characteristic is demonstrated. The effect of the random growth error on the transmission performance of the double half-wave filter with flat-top response is studied, with the transmission matrix method. The simulation indicates that there appear two peaks with different height in the transmission spectra when the physical thickness difference of the two Fabry-Pérot cavities exceeds 1 nm, which illustrates the two-peak asymmetry in the transmission spectra of the tested devices. In addition, the concept of interface random undulation is used to explain why the measured bandwidth of the filter is larger than the theoretical result.

Key words: optical devices; flat-top filter; Fabry-Pérot cavity; double half-wave cavity; transmission matrix

1 引 言

在光网络中, 对通道进行检测时, 波长的快速精确对准是需要解决的重要课题, 具有平顶响应特性的滤波器是一种有效的解决方法。由于现有平顶滤波器不能满足小型化可兼容集成的要求^[1~4], 而半导体滤波器, 尤其是硅基材料制成的滤波器^[5], 有可能满足实用化光网络系统应用的需求。本文介绍一种由 Si 和 SiO₂ 介质膜形成的、具有两个半波长共

振腔的新型平顶滤波器, 并着重讨论随机生长误差及界面起伏对此类双腔型平顶滤波器透射特性的影响。

2 双腔结构实现平顶的原理

人们从耦合多个调谐电路中发现, 耦合电路的合成曲线比单个电路曲线更接近于矩形(理想的滤波波形)。对 FP 滤波器的研究也有类似的结果: 如

* 国家自然科学基金(90401001, 60336010)国家 973 计划(G2000036603)、国家 863 计划(2002AA312010)和资助课题。

作者简介: 蔡 晓(1980~), 男, 广西北海人, 中国科学院半导体研究所硕士研究生, 主要从事硅基光电子器件的研究。

** 通信联系人。E-mail: yhzuo@red.semi.ac.cn

收稿日期: 2005-04-15; 收到修改稿日期: 2005-10-11

果把两个或更多的滤波器串置起来,中间用耦合层连接,可以得到通带接近矩形(平顶)的滤波波形。

利用虚设层概念^[6],设计出一种双腔结构(双半波)全介质法布里-珀罗滤波器,如图1。

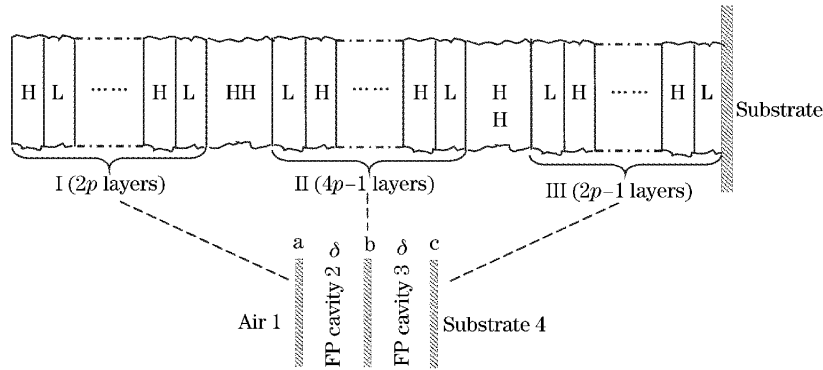


图1 Si和SiO₂介质膜构成的双半波法布里-珀罗滤波器以及史密斯分析

Fig.1 Double half-wave Fabry-Pérot (FP) filter with Si and SiO₂ films and Smith analysis

其中,H表示光学厚度为中心波长1/4的高折射率Si介质膜;L表示光学厚度为中心波长1/4的低折射率SiO₂介质膜;HH表示光学厚度为中心波长1/2的Si介质膜;衬底是厚度大约为600 μm的Si层。 p 为整数。

假设子膜系I(等效界面a)的特性矩阵表示为 M_I ,子膜系II(等效界面b)的特性矩阵表示为 M_{II} ,子膜系III(等效界面c)的特性矩阵表示为 M_{III} 。考虑中心波长附近的入射光(也就是 $\lambda \approx \lambda_0$),则各个特性矩阵近似为

$$M_I = (M_{Si} \cdot M_{SiO_2})^p = \begin{bmatrix} (-n_{SiO_2}/n_{Si})^p & 0 \\ 0 & (-n_{Si}/n_{SiO_2})^p \end{bmatrix},$$

$$M_{II} = (M_{SiO_2} \cdot M_{Si})^{2p-1} M_{SiO_2} = \begin{bmatrix} 0 & (-i/n_{SiO_2})(-n_{Si}/n_{SiO_2})^{2p-1} \\ -in_{SiO_2}(-n_{SiO_2}/n_{Si})^{2p-1} & 0 \end{bmatrix},$$

$$M_{III} = (M_{SiO_2} \cdot M_{Si})^{p-1} M_{SiO_2} = \begin{bmatrix} 0 & (-i/n_{SiO_2})(-n_{Si}/n_{SiO_2})^{p-1} \\ -in_{SiO_2}(-n_{SiO_2}/n_{Si})^{p-1} & 0 \end{bmatrix}.$$

易知等效界面a、b和c的反射相移 ψ_a, ψ_b, ψ_c 等于0。假设 $R_a = |r_{12}|^2, R_b = |r_{23}|^2, R_c = |r_{34}|^2, T_a = n_2 |t_{12}|^2/n_1, T_b = n_3 |t_{23}|^2/n_2, T_c = n_4 |t_{34}|^2/n_3$,其中 R 代表反射率, T 代表透射率。因此图1所示双半波全介质法布里-珀罗滤波器的透射率为

$$T = \frac{(1-R_a)(1-R_b)(1-R_c)}{|1 - \sqrt{R_b R_c} \exp(-2i\delta) - \sqrt{R_a R_b} \exp(-2i\delta) + \sqrt{R_a R_c} \exp(-4i\delta)|^2}, \quad (1)$$

由(1)式,如果界面b的反射率 R_b 选择临界值 R_{crit} ,则

$$R_{crit} = [(\sqrt{R_a} + \sqrt{R_c})/(1 + \sqrt{R_a R_c})]^2. \quad (2)$$

当 $\delta = m\pi$ (m 是整数)时,有 $T=1$ (详细推导过程在这里省略)。图1所示结构的双半波法布里-珀罗滤波器的 R_a, R_b, R_c, R_{crit} 及传输矩阵模拟结果一并在表1中给出,其中 T_{dip} 指峰谷的透射强度, T_{peak} 指峰顶的透射强度, W_{band} 为3 dB带宽。

表1 基于图1的双半波法布里-珀罗滤波器的参量

Table 1 Parameters of double half-wave Fabry-Pérot filters of Fig. 1

p	R_a	R_b	R_c	R_{crit}	T_{dip}	T_{peak}	W_{band}/nm
1	0.819525	0.885899	0.495005	0.965987	0.6914	0.7917	120
2	0.965987	0.996339	0.885899	0.998953	0.6914	0.7919	19
3	0.993997	0.999889	0.979145	0.999968	0.6914	0.7918	3.3
4	0.998953	0.999997	0.996339	0.999999	0.6914	0.7922	0.6

从表 1 可以看到, R_a , R_b 和 R_c 接近满足(2)式所表示的临界关系,但并不完全满足—— R_b 比临界值 R_{crit} 稍小,导致输出响应的中间位置出现小的下降(即 $T < 1$),从而获得平顶曲线。

图 2 显示 $p=1$ (即上反射镜包含一层 Si 和一层 SiO_2 ; 中间反射镜包含一层 Si 和两层 SiO_2 ; 下反射镜包含一层 SiO_2) 的模拟结果。其中峰值透射率大约为 0.7917; 两个峰值之间的凹坑透射率为 0.6914; 3 dB 带宽大约为 120 nm。考虑到生长工艺的简单性,以下的器件设计中使 $p=1$ 。

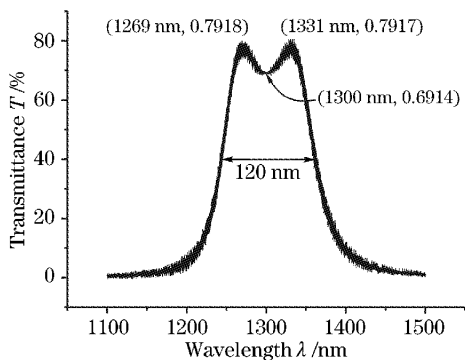


图 2 $p=1$ 的模拟结果

Fig. 2 The simulation curve of $p=1$

3 器件结构

图 3 所示为由 Si 和 SiO_2 介质膜构成的双半波平顶滤波器结构示意图。制作工艺如下,在 n 型 $\langle 100 \rangle$ Si 衬底上利用等离子体增强化学气相沉积 (Plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 方法一次生长完所需的结构。其顺序分别为一层 SiO_2 , 作为下反射镜, 光学厚度为 $\lambda/4$; 一层 Si 层, 作为法布里-珀罗腔 A, 光学厚度为 $\lambda/2$; 一层 SiO_2 、一层 Si、一层 SiO_2 , 作为中间反射镜, 光学厚度均为 $\lambda/4$; 一层 Si 层, 作为法布里-珀罗腔 B, 光学厚度为 $\lambda/2$; 一层

SiO_2 、一层 Si, 作为上反射镜。最后在衬底背面利用等离子体增强化学气相沉积生长 SiN 材料制成的减反膜, 光学厚度为 $\lambda/4$ 。其中, 器件的中心波长 λ 为 1300 nm。

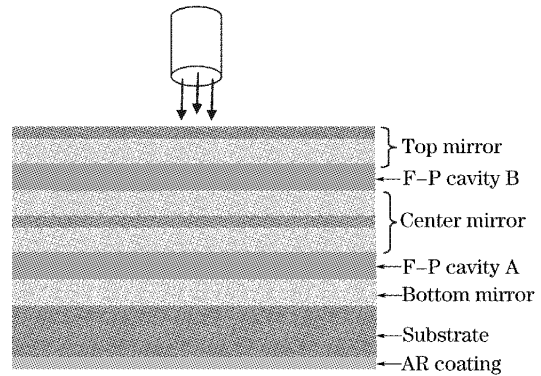


图 3 Si 和 SiO_2 介质膜的双半波平顶滤波器器件

Fig. 3 Schematic diagram of the double half-wave flat-top filter made of Si and SiO_2

4 器件测试与分析

图 4(a)、图 4(b) 分别是器件 (# A2) 的测量透射谱和传输矩阵的模拟透射谱。可见实验测试的透射强度谱与理论模拟的波形有较大差别。其一, 器件法布里-珀罗腔的生长厚度比原设计值小, 使得器件的中心波长并不是 1300 nm 而是比该值要小。实际器件法布里-珀罗腔的中心波长在大约 1230 nm 附近, 使得实验测量的透射谱蓝移。其二, 实验测试的器件 3 dB 带宽 (215 nm) 大于模拟值 120 nm, 认为这是由于实际器件中反射界面不平整而引起的, 这种界面起伏直接导致共振峰带宽增加。其三, 按照模拟结果, 输出响应的两个峰值应该相等, 但是实验测量值表明左边的峰明显地比右边的峰要高。认为这种双峰不对称性是两个法布里-珀罗腔的光学厚度不同所致。

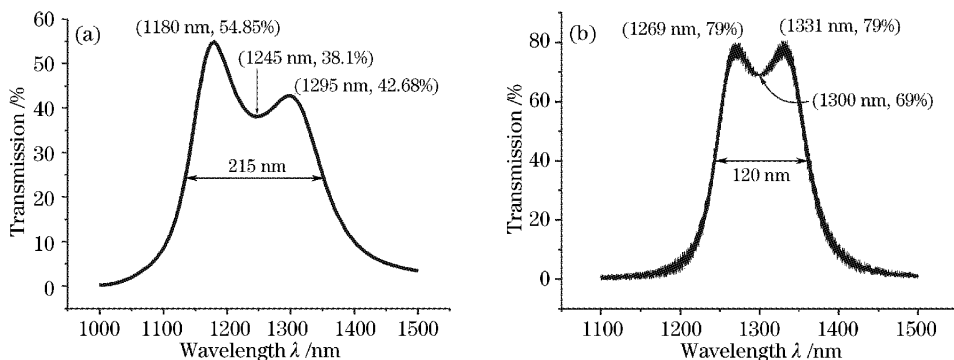


图 4 器件 (# A2) 的测量透射谱 (a), 传输矩阵模拟 (b)

Fig. 4 The measured transmission spectrum curve of device # A2, (b) simulated transmission spectrum of device # A2

根据统计学理论,界面起伏的几率可以近似用高斯函数来模拟

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right),$$

其中 σ 为高斯分布的半峰全宽,即均方根值,可以由原子力显微镜(AFM)数据来估计。

透射谱计算如下式所示:

$$T(\lambda) = \int T(x)F(x)dx / \left[\int F(x)dx \right],$$

当半峰全宽 $\sigma=25$ nm,对应的中心波长为 1230 nm 时,采用经典的传输矩阵方法^[6]得到的模拟结果如图 5 所示,其带宽与实测结果图 4(a)接近。模拟结果与实验结果仅在两峰峰形高度上存在差异,而这正是下文将讨论的重点。

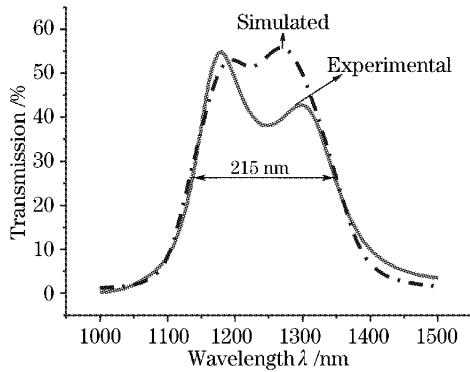


图 5 引入界面起伏后器件(# A2)的模拟结果与实验结果对比

Fig. 5 The contrast between the experimental result and the simulated one after introducing the concept of interface random undulation of device # A2

将随机误差参量引入到传输矩阵方法中进行计

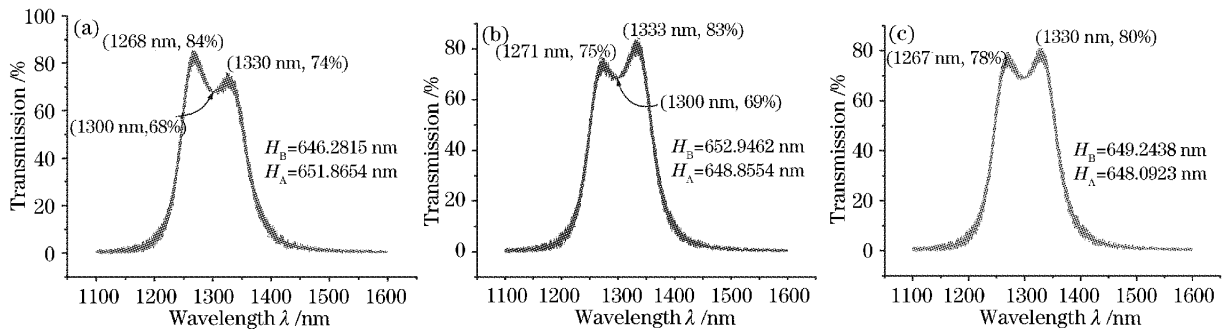


图 6 (a) $H_B < H_A$ 的波形, (b) $H_B > H_A$ 的波形, (c) $H_B \approx H_A$ 的波形

Fig. 6 (a) The curve with the left peak higher than the right one (b) the curve with the left peak lower than the right one (c) the curve with the left peak equal to the right one

由图 6(a)~图 6(c)的计算结果看到,只要两个法布里-珀罗腔的物理厚度差超过一个纳米,一峰高

算,用到的主要参量为

$\lambda_0 = 1300$ nm(中心波长);

$H_A = (\lambda_0/2) \cdot (1 + \text{ErrorA})$

(法布里-珀罗腔 A 的光学厚度);

$H_B = (\lambda_0/2) \cdot (1 + \text{ErrorB})$

(法布里-珀罗腔 B 的光学厚度);

ErrorA, ErrorB

表示在一定范围内随机产生的误差值。

假设法布里-珀罗腔的最大生长误差为 1%, 这时

$$0.99 \cdot \lambda_0/2 \leq H_A < 1.01 \cdot \lambda_0/2,$$

$$0.99 \cdot \lambda_0/2 \leq H_B < 1.01 \cdot \lambda_0/2.$$

让 H_A 和 H_B 在上述区间内随机变化来观察透射强度谱的波形。在观察大量模拟结果后,会出现三类波形:一类是图 6(a)所示的左峰高右峰低的波形,一类是图 6(b)所示的左峰低右峰高的波形,还有一类是图 6(c)所示的两峰基本上齐平的波形。

从图 6 可以看到,当靠近入射光一侧的法布里-珀罗腔 B 的光学厚度 H_B 小于靠近衬底一侧的法布里-珀罗腔 A 的光学厚度 H_A 时,总会出现左侧透射峰高于右侧透射峰的波形,并且两个峰值透射率相加基本上是一个常数(大约为 1.58)。在图 6(a)中,两个法布里-珀罗腔的物理厚度差约 1.6 nm(A、B 两腔的物理厚度差 $|H_A - H_B|/B_{Si}$)。反之,当 H_B 大于 H_A 时,则左峰低右峰高,如图 6(b)所示,此时两个法布里-珀罗腔的物理厚度差约 1.2 nm。只有 H_B 接近 H_A 时,两峰才会基本齐平,且两个峰值透射率相加基本上是一个常数(大约为 1.58)。如图 6(c)中,两个法布里-珀罗腔的物理厚度差约 0.3 nm。

一峰低的波形必定会出现。因此,利用双腔结构来实现平顶对介质膜的生长的容差要求极高。

图 4(a)所示的器件测量结果显然属于左峰高右峰低的波形,可以判定靠近入射光一侧的法布里-珀罗腔 B 的光学厚度 H_B 小于靠近衬底一侧的法布里-珀罗腔 A 的光学厚度 H_A ,而且两者的物理厚度差要大于 1 nm。

4 结 论

介绍了一种由 Si 和 SiO_2 介质膜形成的、具有两个半波长共振腔的滤波器。采用传输矩阵的方法,研究了随机生长误差和界面起伏对双腔型平顶滤波器透射特性的影响。模拟分析表明,当两个法布里-珀罗腔的物理厚度差超过一个纳米时,在透射谱中就会出现两个高度不同的透射峰。这即解释了实测器件的透射谱中的双峰不对称性。而实验透射谱半宽大于理论值,则是由于介质膜系中存在较大的界面起伏所致。另一方面由模拟结果也说明,在对介质膜的生长进行精确的控制的前提下,采用双腔结构有可能获得理想的平顶效果。

参 考 文 献

- 1 Chao-Hsing Hsieh, Ruibo Wang, Zhiqing Wen *et al.*. Flat-top interleavers using two Gires-Tournois etalons as phase-dispersive mirrors in a Michelson interferometer[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(2): 242~245
- 2 Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Design of a new type interleaver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1424~1428 (in Chinese)
张 娟,刘立人,周 煜等. 一种新型光交错复用器的设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1424~1428
- 3 Chen Haixing, Li Haifeng, Gu Peifu *et al.*. Interleaver design based on phase characteristics of Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 37~40 (in Chinese)
陈海星,李海峰,顾培夫等. 基于法布里-珀罗腔反射光相位特性设计的梳状滤波器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 37~40
- 4 Li Jie, Tong Zhengrong, Meng Hongyun *et al.*. Theoretical study on optical comb-filter of cascaded M-Z interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 41~44 (in Chinese)
李 杰,童峥嵘,蒙红云等. 级联马赫-曾德尔干涉仪光学梳状滤波器的理论研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 41~44
- 5 Cai Xiao, Zuo Yuhua, Wang Qiming. Thermo-optical tunable Fabry-Perot filter with flat-top response[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(10): 1144~1148 (in Chinese)
蔡 晓,左玉华,王启明. 平顶响应的热光可调谐 Fabry-Perot 滤波器[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(10): 1144~1148
- 6 Born M., Wolf E.. *Principles of Optics* [M]. Oxford: Pergamon, 1975