

Si 基热光可调谐窄带平顶滤波器 *

左玉华 蔡 晓 毛容伟 王启明

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 利用 Si 键合技术、台阶型 F-P 腔结构以及 Si 良好的热光效应, 研制了一种新型全 Si 基的热光可调谐窄带平顶滤波器. 器件的平顶宽度为 2nm, 3dB 带宽为 4.4nm, 自由谱宽约为 8.5nm, 在外加电场作用下, 共振峰红移 3.3nm.

关键词: 平顶滤波器; 热光调谐; Si 基; 窄带

PACC: 4208S

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)11-2218-05

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.在已有的平顶滤波器中,一类是采用多个透镜组构成的平顶滤波器系统^[1~3],需要较复杂、分立的装置,因而不易与其他无源或有源器件集成以实现各种复杂功能;由于本身结构的限制,其性能也不是特别优越,只能基本上实现平顶响应特性.另一类是利用光栅或 AWG 技术构成的半导体滤波器^[4,5],其平顶性能较好,但制作工艺复杂、成本高.

由于现有平顶滤波器不能满足小型化可兼容集成的要求,且平顶特性不甚理想,而半导体滤波器,尤其是 Si 基材料制成的滤波器^[6,7],有可能满足实用化光网络系统应用的需求,并且能够实现低成本.本文报道一种新型 Si 基可调谐窄带平顶滤波器的原理、制作及其原型器件的测试结果.我们曾报道过 Si 基热光调谐宽带平顶滤波器^[8],即采用湿法腐蚀方法腐蚀 Si 腔,通过形成台阶型 F-P 腔结构来获得平顶;然后在 Si 腔上制作金属电极加热器,实现了热光调谐.由于 Si 腔为 PECVD 方法生长出的非晶 Si 腔,受材料生长条件所限,其厚度很难突破微米

量级.另一方面,受上下反射率所限(90%左右),Si 腔越短,其 3dB 带宽越大,故器件的 3dB 带宽达到了 94nm.本文在以往方法的基础上,利用 Si 键合技术获得几十微米厚的单晶 Si 腔,制作出窄带可调谐平顶滤波器,3dB 带宽压缩至 4.5nm.

2 实验原理

详细的公式推导及实验原理可参见文献[8],本文给出主要原理.

2.1 平顶的获得

考虑图 1 所示的台阶型 F-P 腔,该 F-P 腔由同种材料但不同厚度的两个部分构成,假设两个部分的光照射面积相等.其中一个部分的厚度为 l ,该部分对应的共振波长为 $\lambda_m = \frac{2nl}{m}$;另一部分的厚度为 l' ,所对应的共振波长为 $\lambda'_m = \frac{2n'l'}{m}$.总输出响应是两部分响应的叠加,而叠加的结果与两部分的厚度差 $l = l - l'$ 有关,当 l 太大时,两部分分别产生的透射峰相距较远,作为叠加结果的总输出响应将会呈现 M 形状;当 l 太小时,两个透射峰相距过近,总输出响应仍然保持常规 F-P 腔具有的尖峰形状.

* 国家重点基础研究发展规划(批准号:G2000036603),国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA312010)和国家自然科学基金(批准号:90401001,60036010)资助项目

左玉华 女,博士,助理研究员,主要从事 Si 基光电子器件及材料研究.
2005-04-12 收到,2005-05-20 定稿

事实上,通过选择合适的 l ,可以使叠加结果具有良好的平顶特性.

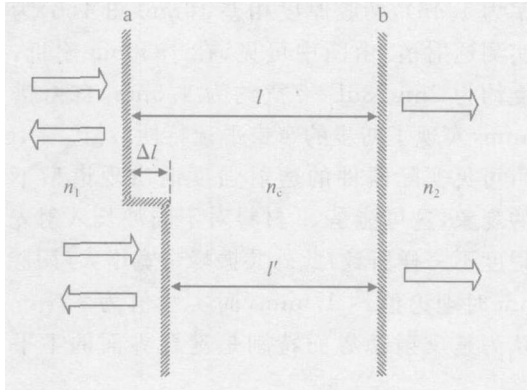


图 1 台阶型 F-P 腔示意图

Fig.1 Schematic structure of the step type Fabry-Perot filter

图 2 是腔长为 $35\mu\text{m}$,上下反射镜分别为一对 Si/SiO₂ (Si 的折射率为 3.5, SiO₂ 的折射率为 1.46),两腔之间相差 6nm 时的模拟结果.当入射光照射到两腔的面积相等,即 a 峰与 b 峰的透射峰强度各贡献 50%时,可叠加出平顶 c 峰,理论上 3dB 带宽可以到 0.5 nm.

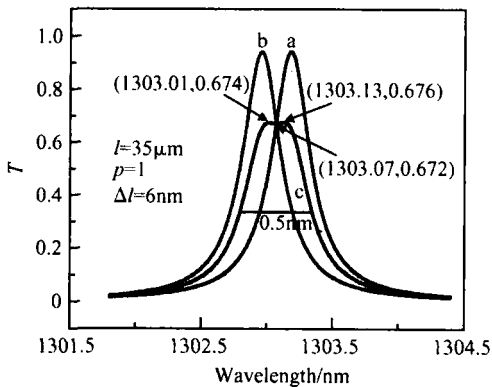


图 2 $l=35\mu\text{m}, p=1, L=6\text{nm}$ 时的模拟透射强度谱

Fig.2 Simulated transmittance spectra at $l=35\mu\text{m}, p=1, L=6\text{nm}$

2.2 热光调谐原理

热光可调谐滤波器的工作原理,是利用温度变化产生折射率的变化,进而引起 Fabry-Perot 腔共振波长的变化.与此同时,由于热膨胀效应,腔长发生变化也导致共振波长的改变.当腔体材料的热光系数和热膨胀系数都为正时(例如 Si),随着温度增加,二者均会引起共振波长的红移.共振峰位随温度变化方程为:

$$\frac{d\lambda}{dT} = \lambda \left(\alpha + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right) \quad (1)$$

其中 有效热光系数定义为 $\alpha_{\text{eff}} = \alpha + \frac{1}{n}$, α 为热膨胀系数, λ 为热光系数, n 为腔体的有效折射率.

由于峰位移动和波长相关,当热光调谐时,滤波器的透射谱会略有畸变.考虑到单晶 Si 和非晶 Si 的热光系数 基本一致,均为 $2 \times 10^{-4} \text{K}^{-1[9]}$,热膨胀系数 α 为 $2.6 \times 10^{-6}[10]$, n 为 3.5,因此有效热光系数 α_{eff} 为 $5.97 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$.考虑 λ_0 为 1300nm,则

$$\frac{d\lambda}{dT} = 0.0766 \text{nm/K} \quad (2)$$

若忽略热膨胀效应引起的腔长变化, Fabry-Perot 腔共振峰移动量与腔体折射率变化的关系为:

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{dn}{n} \quad \text{或} \quad n = \frac{n_{\text{crSi}}}{n_0} \quad (3)$$

当 $n_{\text{crSi}} = 3.5, \lambda_0 = 1300\text{nm}$ 时,

$$\Delta n = 2.69 \times 10^{-3} \quad \text{或} \quad \Delta \lambda = 371.43 \text{nm} \quad (4)$$

3 器件结构及制作

图 3(a)为台阶型 F-P 腔结构的热光调谐平顶滤波器的截面图,图 3(b)是该器件的俯视图.

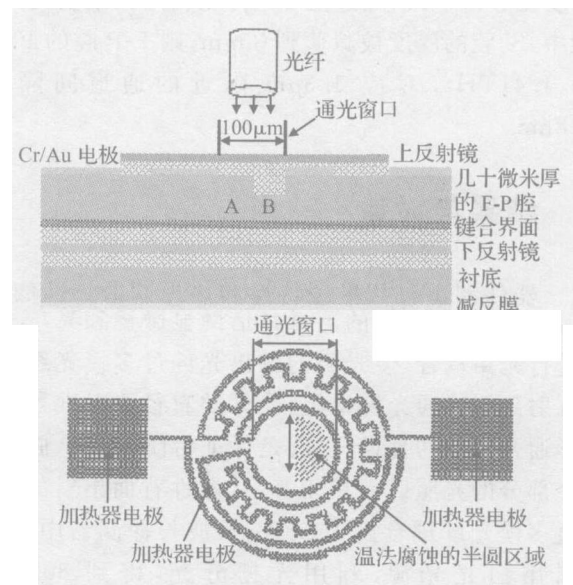


图 3 (a) 台阶型 F-P 腔结构的热光调谐窄带平顶滤波器截面图;(b)热光可调谐平顶滤波器的俯视图

Fig.3 (a) Schematic of cross-section view of thermal-optical tunable flat-top filter with step-type F-P cavity; (b) Top view of tunable thermo-optical flat-top filter

器件的工艺制作流程如下:

(1) 在 n^- Si 衬底上电子束蒸发生长 1.5 对 SiO_2/Si DBR 反射镜, 反射率约为 82% (1.2 ~ 1.5 μm);

(2) 在反射镜上低温键合 380 μm 厚的 n^- Si 基片^[11];

(3) 用 Al_2O_3 颗粒将 DBR 一侧的 Si 减薄, 然后利用 TSE 抛光液进行化学机械抛光(CMP);

(4) Si 片减薄抛光到一定厚度后, 用湿法腐蚀方法获得深度在 10nm 左右, 直径约 50 μm 的半圆形微腔;

(5) 蒸发金属 Cr/Au, 光刻出加热电极, 留出直径为 100 μm 的圆形通光窗口;

(6) 用带胶剥离工艺制作 1 对 SiO_2/Si 上反射镜;

(7) 背面减薄至 ~ 100 μm , 抛光, 并生长 SiN 减反膜;

(8) 解理, 压焊.

其中 Si 基片与 DBR 反射镜之间的键合采用本实验室的 SOR 制备专利技术^[10]. 此外, 减薄和抛光工艺对设备要求较高, 并且要获得大面积均匀的 Si 层, 要求两片 Si 片键合时平行度高. Si 腔厚度取决于对 F-P 腔自由谱宽的要求, 大的 FSR 要求 Si 腔厚度足够薄, 可以通过注 H^+ 智能剥离技术实现. 实验中, Si 腔的厚度被减薄到 30 μm , 则 F-P 腔的 FSR 为 1.41 THz, 对应 1.3 μm 附近的通道间隔为 ~ 8nm.

4 结果与讨论

器件测试包括平顶特性和热光调谐特性的测量. 器件透射强度谱的测量是借助显微镜和光功率计进行光路耦合, 使光源的输出光经过多模光纤垂直入射到器件通光窗口上, 光纤的直径要对准器件圆形通光窗口的直径, 也就是保证台阶型 F-P 腔的两个部分的光照射面积相等, 从器件背面出射的光经过多模光纤耦合到 InGaAs 长波长探测器中. 光源采用白光光源, 利用光栅分光, 得到 800 ~ 1800nm 的宽带光谱. 探测器响应信号经过锁相放大器放大后, 接入实时测量系统进行记录.

4.1 平顶特性测量

图 4(a) 为器件(D2)的模拟透射强度谱, 模拟参

数如下: 腔长为 30.7 μm , 上下反射镜分别为 1 对 Si/SiO_2 (实际生长出的 Si 折射率为 3.0, SiO_2 的折射率为 1.46), 两腔厚度相差 10nm. 图 4(b) 为器件的实测透射谱. 由图中可见, 在 1330nm 附近, 平顶宽度约为 2nm, 3dB 带宽约为 4.5nm, 自由谱宽为 8.5nm, 实现了初步的窄带平顶特性. 对比图 4(a) 与 (b), 可见实际器件的透射强度谱出现谱型不够整齐的现象, 这可能是 Si 材料对不同波长入射光的吸收程度不一样所致; 此外共振峰带宽增大(两腔相差 10nm 时理论值约 1.5nm, 而实验值为 4.4nm), 这被认为是反射镜界面特别是键合界面的不平整所致.

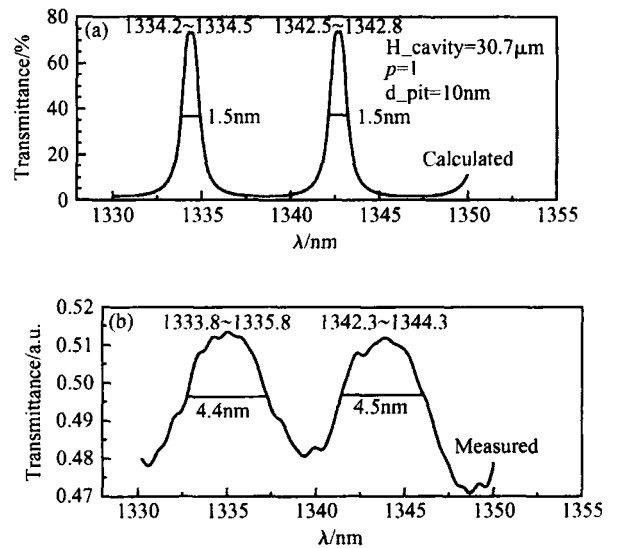


图 4 平顶滤波器(器件 D2)的模拟曲线(a)和测量透射谱(b)
Fig. 4 Simulated curve (a) and measured curve (b) of flat-top filter of device D2

由于器件制作经过两次抛光工艺, 抛光效果对器件的散射损耗影响很大, 加上生长的 DBR 界面及键合界面的不平整, 使得整个器件的插入损耗较大, 约 5dB; 同时隔离度不够高, 表现为最大与最小透射率相差较小(不到 2 倍). 在下一步的工作中, 需提高抛光效果以及优化 DBR 生长工艺, 以减小散射损耗, 降低插入损耗.

4.2 调谐特性测量

器件的热光调谐是通过在加热器的两个电极施加电压, 利用 Cr/Au 的焦耳热效应来实现的. 图 5(a) 为不同外加电压下, 器件(D1)的透射强度谱.

从图 5(a) 可以看到, 随着外加电压增大, 器件

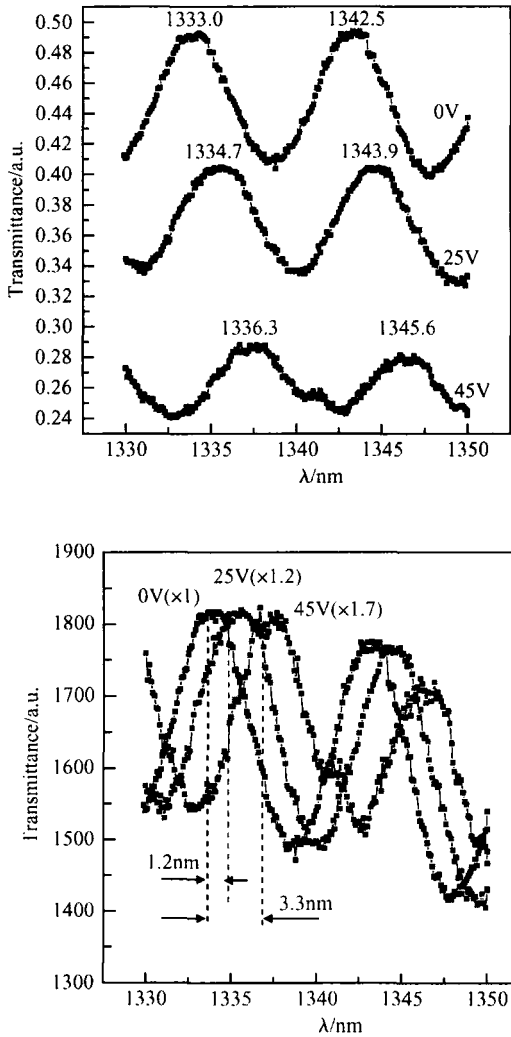


图 5 (a) 器件 D1 在不同外加电压下的透射强度谱; (b) 放大后的透射谱对比

Fig. 5 (a) Transmittance spectra under different applied voltages; (b) Amplified curves of device D1

透射峰向右红移. 这是由于外加电压引起的焦耳热效应使器件温度上升, 导致折射率增加的缘故. 另一方面, 随着外加电压增大, 透射峰强度逐渐减小, 这可能是由于存在某种随温度升高吸收系数增大的吸收机制而导致光吸收增强的缘故.

为了准确确定红移的数值, 我们将不同电压时的透射强度谱放大相应的倍数, 以消除峰值强度减弱的效果, 如图 5(b) 所示. 在 25V 外加电压下, 透射峰红移约 1.2nm, 在 45V 外加电压下, 透射峰红移约 3.3nm. 当外加电压进一步增大时, 共振峰将进一步向右移动. 这里所加的调谐电压较高是由于导线引出时采用的导电胶电阻过大所致. 通过改善欧姆接触, 避免用导电胶, 可以解决该问题.

5 结论

本文报道了一种新型 Si 基热光可调谐窄带平顶滤波器. 它利用 SOR Bonding 技术以及台阶型 F-P 腔获得窄带平顶效果. 其具有较好的平顶性能, 平顶宽度约为 2nm, 3dB 带宽约为 4.4nm, 自由谱宽约为 8.5nm. 利用热光效应可获得 3.3nm 的波长移动.

与实现平顶响应的其他方法相比, 本文的滤波器器件的制作工艺简单, 与 Si 工艺兼容, 成本低廉, 易与其他有源和无源光子器件集成.

参考文献

- [1] Chen S Q, Liu Y M, Wu L. Narrow-band tunable filter with multi-cavity structure of flat-top and steep-edge frequency response. European Patent Application, CN 1349318, 2002
- [2] Touhari D, Colbourne P, Paiam R. Optical filter. European Patent Application, CA244003, 2001
- [3] Hsieh C H, Wang R, Wen Z, et al. Flat-top interleavers using two Gires-Tournois etalons as phase-dispersive mirrors in a Michelson interferometer. IEEE Photonics Technol Lett, 2003, 15(2) :242
- [4] Kitoh T, Inoue Y, Itoh M, et al. Low chromatic-dispersion flat-top arrayed waveguide grating filter. Electron Lett, 2003, 39(15) :1116
- [5] Wang Q J, Zhang Y, Soh Y C. Efficient structure for optical interleavers using superimposed chirped fiber Bragg gratings. IEEE Photonics Technol Lett, 2005, 17(2) :387
- [6] Huang C J, Zuo Y H, Cheng B W, et al. Si-based thermal-optical resonant-cavity tunable filter. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(12) :1312 (in Chinese) [黄昌俊, 左玉华, 成步文, 等. 热光 Si 共振腔型可调谐滤波器. 半导体学报, 2003, 24(12) :1312]
- [7] Zuo Y H, Cai X, Huang C J, et al. 1.55 μ m Fabry-Perot thermo-optical tunable filter with amorphous-Si as the cavity. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(9) :911
- [8] Cai X, Zuo Y H, Wang Q M. Thermo-optical tunable Fabry-Perot filter with flat-top response. Journal of Optoelectronics · Laser, 2004, 15(10) :1144 (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. 光电子 · 激光, 2004, 15(10) :1144]
- [9] Dieckröger J, März R, Clemens P C, et al. Thermo-optically tunable optical phased array in SiO₂-Si. IEEE Photonics Technol Lett, 1999, 11(2) :248
- [10] King J A. Materials handbook for hybrid microelectronics. Boston: Artech House, 1988

[11] Mao R W,Zuo Y H,Li C B ,et al. Fabrication of 1.55 μ m Si-based resonant cavity enhanced photodetectors. Chinese Jour-

nal of Semiconductors ,2005 ,26(2) :271

Fabrication of a Novel Si-Based Thermo-Optical Tunable Flat-Top Filter with Narrow Band^{*}

Zuo Yuhua , Cai Xiao , Mao Rongwei , and Wang Qiming

(National Key Laboratory of Integrated Optoelectronics , Institute of Semiconductors ,
Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 , China)

Abstract : Based on a step-type F-P cavity structure ,a novel all Si-based thermo-optical tunable flat-top filter with narrow band is fabricated ,using our patent SOR(silicon-on-reflector) bonding technology. The device demonstrates a flat-top width of 2nm , 3dB band of 4.4nm ,FSR(free spectra range) of 8.5nm ,and a red-shift of the transmittance peak of 3.3nm under the applied voltage.

Key words : flat-top filter ; thermo-optical tunability ; Si-base ; narrow band

PACC : 4208S

Article ID : 0253-4177(2005)11-2218-05

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. G2000036603) ,the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA312010) ,and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 90401001 ,60036010)

Zuo Yuhua female ,PhD ,assistant professor. She is majoring in Si-based optoelectronic materials and related devices.

Received 12 April 2005 ,revised manuscript received 20 May 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics