

# 热光调谐滤波器的高温性能分析\*

左玉华 毛容伟 李传波 赵 雷 蔡 晓 成步文 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: 研究了热处理对 Si 基热光 Fabry-Perot (F-P) 腔可调谐滤波器的影响, 用原子力显微镜分析了高温热退火前后的器件表面变化. 发现随着退火温度的升高, 器件的透射峰发生蓝移, 同时透射峰强度及 DBR(distributed Bragg reflector) 反射率下降. 透射峰蓝移是非晶硅和 SiO<sub>2</sub> 致密后折射率增大而厚度减小, 最终导致 DBR 中心波长偏短所致; DBR 反射率下降和透射峰强度的下降是高温下表面和界面变得起伏较大所致.

关键词: 热光效应; Fabry-Perot; 可调谐滤波器; 热处理

EEACC: 4140F; 6260M PACC: 5130; 6140

中图分类号: TN713 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)S0-0200-04

## 1 引言

热光可调谐滤波器由于工艺简单、易于集成, 成为一种重要的调谐方案<sup>[1~3]</sup>. 其工作稳定性, 尤其是热稳定性易被忽视, 但对器件实用化而言, 它是非常重要的性能指标. 本文通过研究快速热退火对 Si 基热光可调谐滤波器的 DBR 反射率及器件的透射率的影响, 以期分析 Si 基热光可调谐滤波器的高温性能及热稳定性.

## 2 实验

热光可调谐滤波器的器件结构如图 1 所示. 上下 DBR 由电子束蒸发所作, 分别为 3.5 对和 3 对 SiO<sub>2</sub>/Si 构成, 其中心波长均在 1.55 μm 附近. 非晶硅腔由夹在上、下 DBR 中非晶硅构成, 腔体的光学厚度为 λ/2. 器件的具体制备工艺见文献<sup>[3]</sup>.

将器件在 400, 800℃ 下, 氮气气氛中快速退火 60s. 退火前后样品的透射谱采用 Cary 5E UV-VIS-NIR 分光光度计测试. AFM 观察 800℃ 退火前后的样品表面.

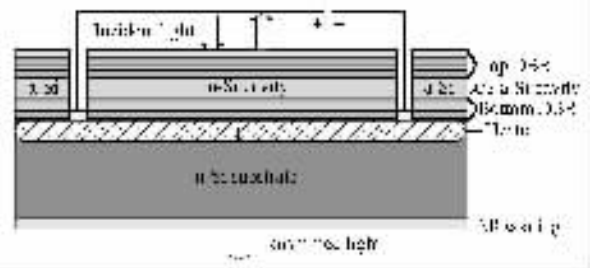


图 1 非晶 Si 热光可调谐滤波器结构示意图<sup>[3]</sup>

Fig. 1 Schematic structure of amorphous Si-based thermo-optical tunable filter

## 3 结果与讨论

实验中我们发现, 当温度升高过大时(如做外引线的 Au 丝发生熔断时), 热光滤波器的原始透射波长将发生不可恢复的明显蓝移, 如图 2 所示. 原始的透射波长由 1564nm 移至 1534nm, 同时峰值强度下降. 下面将对以上的两个现象做进一步研究分析.

热光调谐滤波器在使用过程中, 随调谐范围增大, 温度逐渐升高, 相当于对器件进行了局部热退火. 首先研究 DBR 本身的高温退火特性. 用电子束蒸发方法生长的 Si/SiO<sub>2</sub> 为非晶态, 在器件制作过程中会遇到高温处理工艺, 这就要求所制备的

\* 国家重点基础研究发展规划(批准号: G2000036603), 国家自然科学基金(批准号: 69104003) 和国家高技术研究发展计划(批准号: 2002AA312010) 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.

2004-09-15 收到, 2004-12-01 定稿

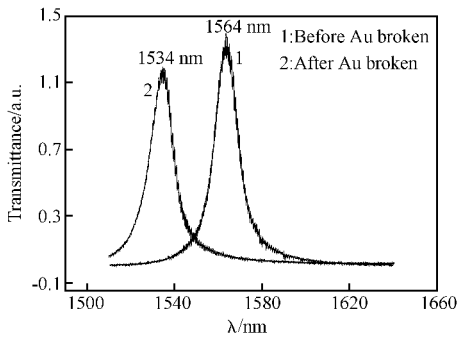


图 2 Au 丝熔断前后的热光可调谐滤波器的透射谱

Fig. 2 Transmittance spectra of tunable filter before and after the Au silk broke

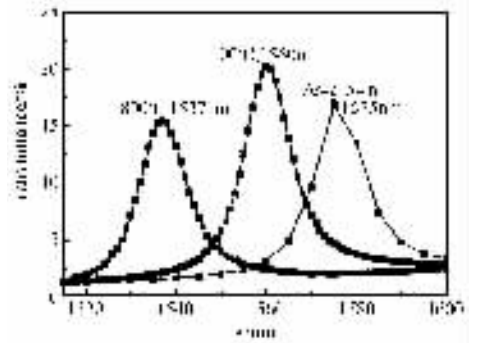


图 4 高温退火对热光可调谐滤波器透射谱的影响

Fig. 4 Effect of high temperature on the transmittance spectra of thermo-optical tunable filter

Bragg 反射器在器件制作过程保持良好的热稳定性,因此 Bragg 反射器高温退火特性的研究是十分必要的. 李成<sup>[4]</sup>研究了 750, 850, 950 和 1000℃ 下, 氮气中快速退火 300s 后样品的反射谱, 如图 3 所示. 退火温度越高, 反射率越低, 这可能是因为在高温下非晶硅和 SiO<sub>2</sub> 致密后折射率和厚度变化导致该层不完全满足四分之一波长条件造成的, 或者退火使表面和界面变得起伏较大而引起<sup>[4]</sup>.

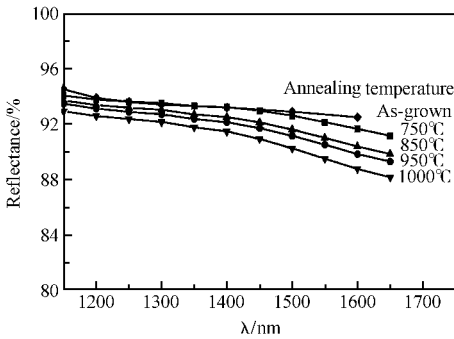


图 3 高温退火对 Bragg 反射器反射的影响<sup>[4]</sup>

Fig. 3 Effect of high temperature on the reflectivity of DBR

在此基础上, 研究了 400, 800℃ 下, 氮气中快速退火 60s 后热光可调谐滤波器的透射谱, 如图 4 所示.

随退火温度升高, 透射峰峰位逐渐蓝移. 400℃ 退火后, 透射峰由原来的 1575nm 移至 1560nm, 而 800℃ 退火后峰位则移动至 1537nm. 这一现象与图 1 中 Au 丝熔断后的蓝移现象一致. 结合图 2 反射谱的变化, 可以认为这种蓝移现象源自高温下非晶硅和 SiO<sub>2</sub> 致密后折射率和厚度的变化. 随着致密化程度增大, 折射率增大, 而厚度减小, 前者使 DBR 中心波长变长, 后者则使 DBR 中心波长变短. 既然透射

峰发生了蓝移, 说明厚度减小的影响大于折射率增大的影响.

为分析透射峰强度及反射率下降的原因, 我们研究了退火对器件表面形貌的影响. 图 5(a), (b) 分

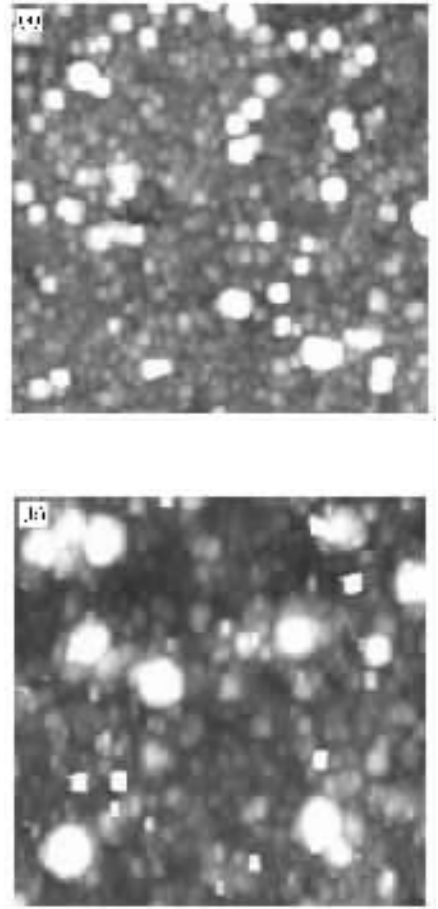


图 5 样品的 AFM 形貌图 (a) 未退火样品; (b) 800℃ 快速退火 1min 后的样品

Fig. 5 AFM images (a) As-grown sample; (b) Sample after 1min rapid thermal process at 800℃

别给出了未退火样品和 800℃ 快速热退火 1min 后样品的 AFM 形貌图 ( $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ ). 不同样品的 AFM 图像的统计数据见表 1.

表 1 不同样品的 AFM 图像的统计数据

Table 1 Statistic data of AFM of different samples

样品	未退火	800℃ 退火 1min
最大表面起伏 Z range/nm	42.77	56.23
平均晶粒尺寸 Raw mean/nm	1.857	10.546
均方根粗糙度 RMS/nm	3.874	7.239
平均粗糙度 $R_a$ /nm	2.621	5.352

由表 1 知, 800℃ 退火 1min 样品的表面 RMS 粗糙度和平均粗糙度  $R_a$  比未退火样品均增大了两倍, 最大表面起伏由 42.77nm 增加到 56.23nm, 平均晶粒尺寸则增大了 6 倍. 这证实了退火使表面和界面的表面起伏加大的设想. 同时也说明晶粒发生了聚集, 组成了一些较大的晶粒. 从光学显微镜中, 可看到 DBR 中的微孔也发生了聚集长大. 如果原始的 DBR 中只存在一些很细小的微观孔隙, 那么随着温度升高到 800℃, 这些微观孔隙则会聚集成为尺寸更大的近于宏观的孔洞缺陷.

由此可见, 在高温下, 晶粒尺寸增大, 表面起伏增大, 表面的散射增大, 导致器件的透射峰强度下降. 镜面起伏对透射峰强度的影响详见文献[5].

## 4 结论

研究了热光可调谐器件的高温退火特性. 随着退火温度的升高, 器件的透射峰发生蓝移, 透射峰强度下降, DBR 反射率下降. 透射峰蓝移是非晶硅和  $\text{SiO}_2$  致密后折射率和厚度变化引起的 DBR 中心波长偏短所致, DBR 反射率下降和透射峰强度的下降是退火使表面和界面变得起伏较大所致. 指出器件的高温劣化使热光可调谐滤波器的调谐范围受限于最大温度变化范围.

## 参考文献

- [1] Hohlfeld D, Epmeier M, Zappe H. A thermally tunable, silicon-based optical filter. *Sensors and Actuators A*, 2003, 103: 93
- [2] Iodice M, Cocorullo G, Della Corte F G, et al. Silicon Fabry-Perot filter for WDM systems channels monitoring. *Optics Communications*, 2000, 183: 415
- [3] Zuo Y H, Cai X, Huang C J, et al. 1.55 $\mu\text{m}$  Fabry-Perot thermo-optical tunable filter with amorphous-Si as the cavity. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(9): 911
- [4] Li C. SiGe/Si MQW resonant-cavity detector. Institute of Semiconductors CAS PhD Thesis, 2000 (in Chinese) [李成. SiGe/Si MQW 共振腔光电探测器. 中国科学院半导体研究所博士论文, 2000]
- [5] Zuo Y H, Huang C J, Mao R W, et al. The effect of mirror undulation on optical property of Si-based MEMS optical tunable filter. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(6): 661 (in Chinese) [左玉华, 黄昌俊, 慕容伟, 等. 镜面起伏对 1.55 $\mu\text{m}$  Si 基 MEMS 光滤波器的影响. 光子学报, 2003, 32(6): 661]

## Effect of High Temperatures on Characteristics of Thermo-Optical Tunable Optical Filters \*

Zuo Yuhua, Mao Rongwei, Li Chuanbo, Zhao Lei, Cai Xiao, Cheng Buwen, and Wang Qiming

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

**Abstract:** The effect of high temperature on the characteristics of Si-based thermo-optical tunable optical filters is extensively investigated. Rapid thermal treatments from 400°C to 800°C are employed to the filters and transmittance properties and atomic force microscopes (AFM) are measured. It is found that the transmittance peak blue shifts and the reflectance of DBR decreases, the surface roughness and the grain size of the samples become larger, when the heat treatment temperature increases. It is suggested that the blue-shift of the transmittance peak is induced by the reduce of center wavelength of DBR, which is caused by the refractive index as well as the thickness change of amorphous Si and SiO<sub>2</sub> at high temperature. The decrease of the reflectivity and transmittance peak intensity is contributed to the larger roughness of surface and interface at higher temperature.

**Key words:** thermal-optical; Fabry-Perot; tunable optical filter; rapid heat treatment

**EEACC:** 4140F; 6260M      **PACC:** 5130; 6140

**Article ID:** 0253-4177(2005)S0-0200-04

---

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(No. G2000036603), the National Natural Science Foundation of China(No. 69104003), the National High Technology Research and Development Program of China(No. 2002AA312010)

Zuo Yuhua female, PhD, assistant professor. Her current interest is in Si-based optoelectronics devices and materials.

Received 15 September 2004, revised manuscript received 1 December 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics