

## 一种热光可调谐级联微环滤波器的理论分析\*

任光辉 陈少武<sup>†</sup> 曹彤彤

(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)

(2011年3月16日收到; 2011年3月30日收到修改稿)

根据 Vernier 效应可大幅度提高滤波器自由光谱范围和调谐范围, 设计了一种热光可调谐级联微环滤波器. 利用传输矩阵方法和有限元方法从理论上计算了对于第一级微环半径为  $48\ \mu\text{m}$ , 第二级半径为  $50\ \mu\text{m}$  的级联微环滤波器的自由光谱范围和调谐范围可以达到  $75.6\ \text{nm}$ , 而功耗仅为  $103.1\ \text{mW}$ , 这是目前为止我们所知的基于微环谐振腔的硅基热光可调谐滤波器中最大的自由光谱范围和在如此低功耗下最大的调谐范围. 利用有限元方法, 还计算了半径为  $50\ \mu\text{m}$  微环的热光调谐响应时间, 上升沿时间为  $3.5\ \mu\text{s}$ , 下降沿时间仅为  $0.8\ \mu\text{s}$ .

**关键词:** PLC 光子集成回路, 级联微环滤波器, 热光效应

**PACS:** 42.82.-m, 84.30.Vn, 78.20.N-

## 1 引言

光网络发展方向为高速, 大容量, 高集成度, 以及好的远程控制. 为提高光网络的灵活性和自适应能力, 动态波分复用技术在未来的光网络中将成为一项关键技术. 在波分复用系统中的每一个信道, 波长均不同, 需要滤波器加以控制. 国际通讯联合会的标准是每个信道间隔为  $0.8\ \text{nm}$ ,  $0.4\ \text{nm}$ , 甚至更窄. 如此窄的信道间隔对可调谐滤波器的调谐精度具有更高的要求, 此外为使得信道能够在整个工作波段 (例如 C 波段、L 波段) 内灵活调配, 滤波器的调谐范围要足够大以覆盖整个波段. 对于具有周期性滤波特性的谐振型滤波器, 例如微环谐振腔滤波器, 为了增大调谐的范围要求其自由光谱范围 (FSR) 越大越好. 目前, 增大 FSR 的方法主要有减小微环的半径, 例如, 已经有报道称已经能够做出半径为  $1.5\ \mu\text{m}$  的单个微环<sup>[1]</sup>, 其 FSR 可以达到  $62.5\ \text{nm}$ . 另外一种方法是利用不同半径微环之间的 Vernier 效应<sup>[2-4]</sup> 来达到扩展 FSR 和减小通带波谱侧瓣的效果.

另一方面, 基于 SOI 材料的硅光子线波导特别适用于高密度光子集成, 且制备工艺和现有的微电

子 CMOS 标准工艺兼容性高, 因此是未来光子集成芯片的首选技术. 基于 SOI 光子线波导的微环结构由于它用途的多样性和高集成度, 逐渐成为光子集成技术中重要的基本器件结构单元<sup>[5]</sup>. 利用硅材料热光系数高的优点, 对 SOI 光子线波导微环谐振峰进行热光调谐, 可以实现性能优异的可调谐滤波器<sup>[6-8]</sup>.

本文设计了一种基于 SOI 光波导级联微环的热光调谐光学滤波器, 用传输矩阵法研究级联微环的谐振谱, 利用级联微环谐振谱的 Vernier 效应来增大 FSR, 同时可以实现高  $Q$  值和低功耗. 为了在不同波长的光之间快速转换, 用有限元法模拟了微环热光调谐区的热场分布和热传导特性, 优化设计了微环加热电极.

## 2 器件结构及原理

图 1 为器件的工作原理图, 其中波导设计为脊形波导, 宽度为  $0.4\ \mu\text{m}$ , 内脊高为  $0.34\ \mu\text{m}$ , 平板区高度为  $0.1\ \mu\text{m}$ , 这种结构在波长为  $1.55\ \mu\text{m}$  时满足单模条件<sup>[9]</sup>. 利用薄膜模式匹配法 (FMM), 算出此结构波导的有效折射率在  $1.55\ \mu\text{m}$  波长处

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2007CB613405) 和国家自然科学基金 (批准号: 60877013, 60837001, 61021003) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: swchen@semi.ac.cn

为  $n_{\text{eff}} = 2.832771$ . 为提高调谐精度, 选取微环 1 的半径为  $R_1 = 48 \mu\text{m}$ , 则  $\text{FSR}_1 \approx 2.8 \text{ nm}$ ; 微环 2 的半径为  $R_2 = 50 \mu\text{m}$ , 则  $\text{FSR}_2 \approx 2.7 \text{ nm}$ .  $\Delta\lambda_{\text{FSR}} = \text{FSR}_1 - \text{FSR}_2 = 2.8 - 2.7 = 0.1 \text{ nm}$ . 级联微环的 Vernier 效应如图 2 所示.

从初始对准波长  $\lambda_{00}$  开始, 假设 MRR1 经过  $N$  个谐振峰后和 MRR2 经过  $N+1$  个的谐振峰波长在  $\lambda_{00} + \Delta\lambda_{\text{max}}$  处再次对准, 即  $\text{FSR}_1 \times N = \text{FSR}_2 \times (N+1)$ , 由此可得  $N = 27$ . 因此最大波长调谐范围  $\Delta\lambda_{\text{max}} = \text{FSR}_1 \times 27 = 75.6 \text{ nm}$ .

如果通过控制加热 MRR2 来实现此最大波

长调谐, MRR2 谐振波长需要移动:  $\Delta\lambda_{\text{FSR}} \times N = 2.7 \text{ nm}$ , 共可以得到  $N+1 = 28$  个离散对准波长 (也就是滤波器的输出波长), 这些离散对准波长的间隔为  $\Delta\lambda_{\text{coarse}} = \text{FSR}_1 = 2.8 \text{ nm}$ .

如果再控制加热 MRR1, 使其谐振波长总移动量为  $2.7 \text{ nm}$ , 每次移动步长为  $0.1 \text{ nm}$ , 一共可以得到 27 套梳状光谱, 对于每一套固定的梳状光谱, 通过加热 MRR2 可以获得 28 个离散对准波长, 因此如果同时加热 MRR1 和 MRR2, 则总共可以获得  $M = 27 \times 28 = 756$  个离散波长, 相邻波长间隔为  $\Delta\lambda_{\text{max}}/756 = 75.6/756 = 0.1 \text{ nm}$ .

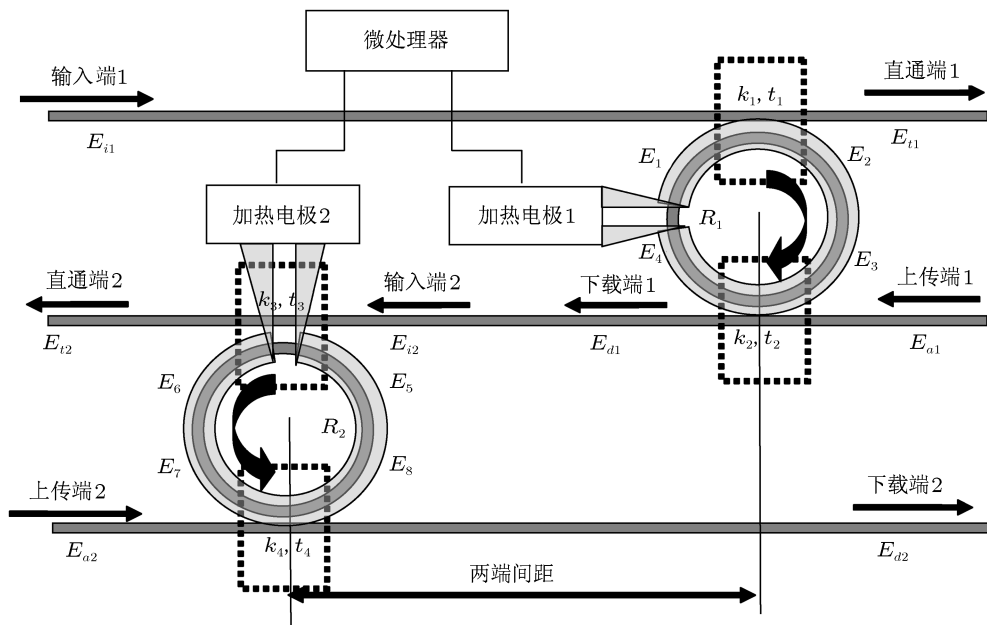


图 1 器件工作原理图

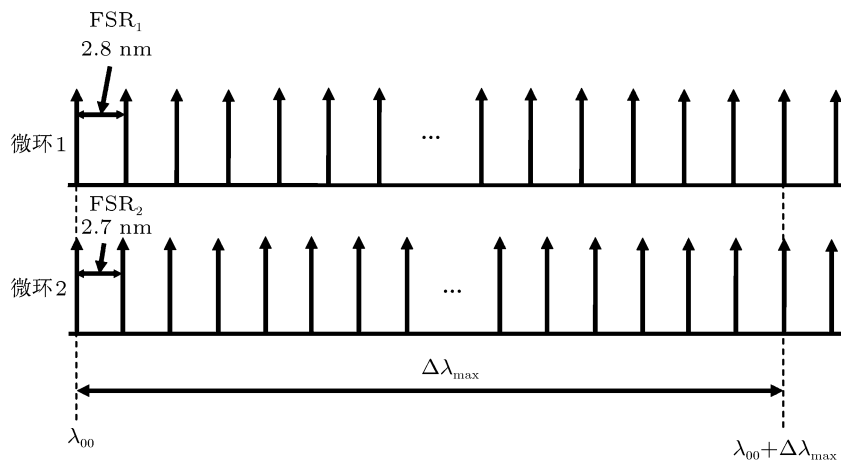


图 2 级联微环 Vernier 效应原理图

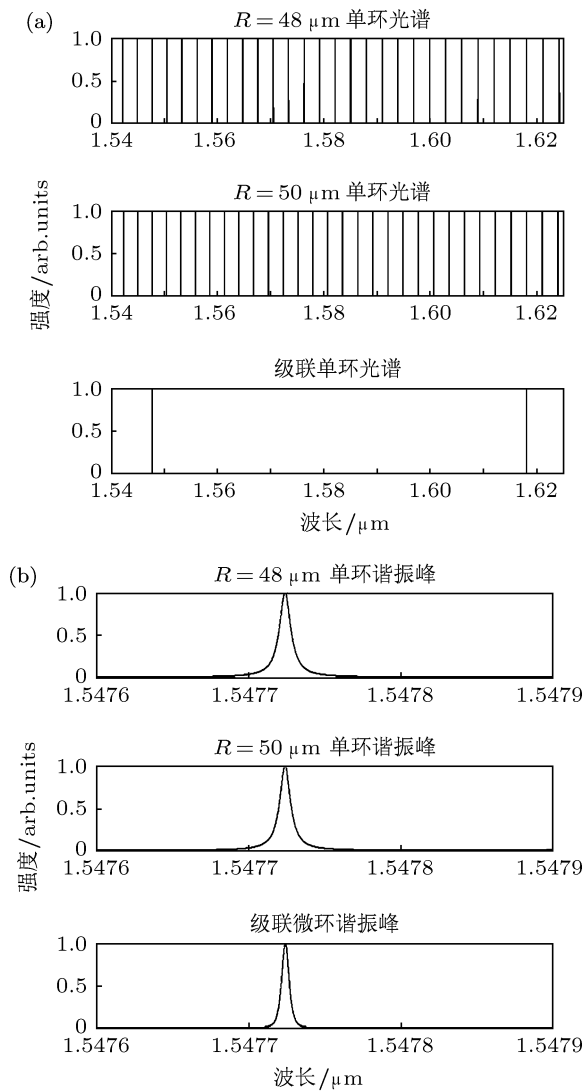


图3 器件的静态光谱图 (a) 整体波谱图; (b) 谐振波长对比图

至此已经确定出, 为实现最大波长调谐范围  $\Delta\lambda_{\max} = 75.6$  nm, 波长间隔为 0.1 nm 的 756

个离散波长, MRR1 和 MRR2 均需要移动 2.7 nm, 移动步长为 0.1 nm.

### 3 静态光谱的理论计算

利用三维 (3D) 全矢量时域有限差分 (FDTD) 法计算出微环和直波导之间间隙 (Gap) 为 450 nm 时的振幅耦合系数为 0.1. 下面将分析级联微环的静态光谱.

设构成波导的有效折射率为  $n_{\text{eff}}$ ; 微环的半径分别为  $R_1$  和  $R_2$ , 则其周长分别为  $L_1 = 2\pi R_1$  和  $L_2 = 2\pi R_2$ ; 微环的传输损耗为  $\alpha_0$  单位为  $\text{cm}^{-1}$ , 则光在环内传输一周的振幅损耗因子为  $\alpha_i = e^{-\alpha_0 L_i/2}$ ,  $i = 1, 2$ ; 微环与直波导之间的耦合效率为  $\kappa_i$ , 透过效率为  $t_i$ , 且满足  $\kappa_i^2 + t_i^2 = 1$ , 其中  $i = 1, 2, 3, 4$ ; 不考虑 Gap 处的相移, 在微环内传输一周后的相位变化为  $\phi_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} L_i$ ,  $i = 1, 2$ .

在本文的级联型滤波器设计中, Add 端无输入光, 即  $E_{a1} = 0$ ,  $E_{a2} = 0$ , 则利用传输矩阵方法 [10-12] 可以得到第一个微环的传输谱:

$$T_{\text{Through1}} = \left| \frac{E_{t1}}{E_{i1}} \right|^2 = \left| \frac{t_1 - \alpha_1 t_2 e^{j\phi_1}}{1 - \alpha_1 t_1 t_2 e^{j\phi_1}} \right|^2 = \frac{(t_1 - \alpha_1 t_2)^2 + 4\alpha_1 t_1 t_2 \sin^2(\phi_1/2)}{(1 - \alpha_1 t_1 t_2)^2 + 4\alpha_1 t_1 t_2 \sin^2(\phi_1/2)}, \quad (1)$$

$$T_{\text{Drop1}} = \left| \frac{E_{d1}}{E_{i1}} \right|^2 = \left| -\frac{\kappa_1 \kappa_2 \alpha_1^{1/2} e^{j\phi_1/2}}{1 - \alpha_1 t_1 t_2 e^{j\phi_1}} \right|^2 = \frac{\alpha_1 \kappa_1^2 \kappa_2^2}{(1 - \alpha_1 t_1 t_2)^2 + 4\alpha_1 t_1 t_2 \sin^2(\phi_1/2)}, \quad (2)$$

第二个微环的传输谱:

$$T_{\text{Through2}} = \left| \frac{E_{t2}}{E_{i1}} \right|^2 = \left| \frac{E_{t2}}{E_{i2}} \cdot \frac{E_{i2}}{E_{d1}} \cdot \frac{E_{d1}}{E_i} \right|^2 = \left| \frac{t_3 - \alpha_2 t_4 e^{j\phi_2}}{1 - \alpha_2 t_3 t_4 e^{j\phi_2}} \right|^2 \cdot \left| -\frac{\kappa_1 \kappa_2 \alpha_1^{1/2} e^{j\phi_1/2}}{1 - \alpha_1 t_1 t_2 e^{j\phi_1}} \right|^2 \cdot \left| e^{-\alpha_0 D/2 + j\frac{D}{L_1} \phi_1} \right|^2 = \frac{(t_3 - \alpha_2 t_4)^2 + 4\alpha_2 t_3 t_4 \sin^2(\phi_2/2)}{(1 - \alpha_2 t_3 t_4)^2 + 4\alpha_2 t_3 t_4 \sin^2(\phi_2/2)} \cdot \frac{\alpha_1 \kappa_1^2 \kappa_2^2}{(1 - \alpha_1 t_1 t_2)^2 + 4\alpha_1 t_1 t_2 \sin^2(\phi_1/2)} \left| e^{-\alpha_0 D/2 + j\frac{D}{L_1} \phi_1} \right|^2 \quad (3)$$

$$T_{\text{Drop2}} = \left| \frac{E_{d2}}{E_{i1}} \right|^2 = \left| \frac{E_{d2}}{E_{i2}} \cdot \frac{E_{i2}}{E_{d1}} \cdot \frac{E_{d1}}{E_{i1}} \right|^2 = \left| -\frac{\kappa_3 \kappa_4 \alpha_2^{1/2} e^{j\phi_2/2}}{1 - \alpha_2 t_3 t_4 e^{j\phi_2}} \right|^2 \cdot \left| -\frac{\kappa_1 \kappa_2 \alpha_1^{1/2} e^{j\phi_1/2}}{1 - \alpha_1 t_1 t_2 e^{j\phi_1}} \right|^2 \cdot \left| e^{-\alpha_0 D/2 + j\frac{D}{L_1} \phi_1} \right|^2 = \frac{\alpha_2 \kappa_3^2 \kappa_4^2}{(1 - \alpha_2 t_3 t_4)^2 + 4\alpha_2 t_3 t_4 \sin^2(\phi_2/2)} \cdot \frac{\alpha_1 \kappa_1^2 \kappa_2^2}{(1 - \alpha_1 t_1 t_2)^2 + 4\alpha_1 t_1 t_2 \sin^2(\phi_1/2)} \cdot \left| e^{-\alpha_0 D/2 + j\frac{D}{L_1} \phi_1} \right|^2. \quad (4)$$

在忽略波导传输损耗的情况下,我们根据以上的计算,选取波导与微环之间的耦合效率均为 0.1,可以得出器件的静态传输谱图,如图 3 所示:

计算结果验证了我们理论上的预测,从图中可以看出滤波器的 FSR 为 76.5 nm,输出波长的 3 dB 带宽要小于单个微环的.这就证明了器件在理论上是行得通的.

#### 4 热光调谐模拟

利用 Si 的热光效应可以对其进行折射率调制,从而可以改变微环的谐振波长.温度在 300—600 K 之间,中心波长在 1.55 μm 处,Si 的热光系数随温度变化关系的经典公式<sup>[13]</sup>为

$$\frac{dn}{dT} = (9.45 \times 10^{-5} + 3.47 \times 10^{-7}T - 1.49 \times 10^{-10}T^2)/K, \quad (5)$$

在常温下,  $\frac{dn}{dT} = 1.86 \times 10^{-4}/K$ .

光波导热光调制区横截面结构如图 4 所示.

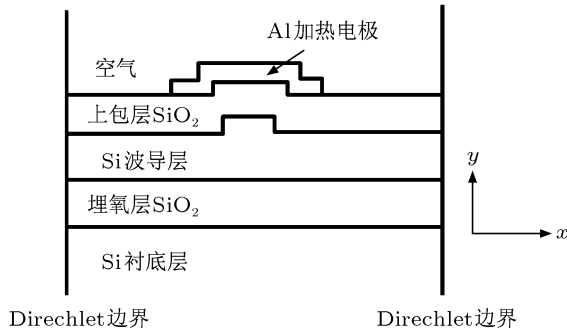


图 4 调制区结构二维模型示意图

利用有限元方法求解热传导方程

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\sigma}{\rho c} \nabla^2 T = \frac{Q}{\rho c}, \quad (6)$$

式中,  $T$  是温度,  $t$  是时间,  $\rho$  是密度,  $\sigma$  是热导率,  $c$  是比热容,  $Q$  系统内热源生热率,也就是单位时间单位体积内产生的热量,对于功率为  $W$ ,横截面积为  $S$ ,长度为  $L_{\text{Electrode}}$  的电极,其生热率为

$$Q = \frac{W}{S \times L_{\text{Electrode}}}. \quad (7)$$

在计算中,我们近似认为  $\rho, \sigma, c$  为常数,选取  $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$  的计算区域,在水平方向上假设两条 Dirichlet 边界,在竖直方向上选取空气的上边

界和衬底 Si 的下边界为 Dirichlet 边界,并且只考虑热量在空气中的传导,忽略空气的对流和辐射,这对于小范围内无空气扰动的情况是足够精确的.

在器件设计中,电极的材料为 Al,厚度为  $1 \mu\text{m}$ ,宽度为  $10 \mu\text{m}$ ,长度为  $314 \mu\text{m}$ ;上包层  $\text{SiO}_2$  厚度为  $3 \mu\text{m}$ ;Si 波导为脊型波导,内脊高为  $0.34 \mu\text{m}$ ,平板区高  $0.1 \mu\text{m}$ ,宽度为  $0.4 \mu\text{m}$ ;埋氧层  $\text{SiO}_2$  厚度为  $2 \mu\text{m}$ .

根据以上的参数,我们利用有限元方法,计算得到调制区的静态特征,如图 5 所示.

由微环谐振腔满足的方程  $n_{\text{eff}}L_i = m\lambda_0$ ,其中  $m$  为整数,可以得到被加热的微环谐振腔中的波长改变为

$$\Delta\lambda = \frac{dn}{dT} \Delta T \lambda_0 / n_{\text{eff}}. \quad (8)$$

以半径为  $50 \mu\text{m}$  的微环为例,如果谐振波长移动 2.7 nm,即其 FSR 的大小,根据 (8) 式计算可得,对于  $\lambda_{00} = 1.547724 \mu\text{m}$  的谐振波长的光,芯区需升温 26.57 K.经过静态分析,电极的加热功率为 103.1 mW,生热率为  $3.283 \times 10^{13} \text{ W/m}^3$ .在瞬态分析中,前  $50 \mu\text{s}$  对电极加该生热率载荷,后  $50 \mu\text{s}$  撤去载荷,让其自由冷却.图 6 为  $50 \mu\text{s}$  加热后冷却得到的调制区中心温度和输出光场能量的动态响应曲线.对初始谐振波长  $\lambda_{00}$ ,在不加热时,输出端有光输出,升温过程中由于波导的折射率发生改变,使得微环谐振腔的谐振波长发生红移,输出端输出的光强逐渐减小,当谐振波长红移到下一级谐振波长处时,输出光强又会逐渐增大到最大值;在撤去加热源降温过程中,微环谐振腔谐振波长发生蓝移,谐振峰再次偏离,使得输出端的光强再次减小.我们定义光强变化 10%—90% 对应的时间为响应时间(速度),从图中可以得到初始谐振波长光强下降时间为  $0.8 \mu\text{s}$ ,下一级谐振波长光强上升时间为  $3.5 \mu\text{s}$ .上升时间远远大于下降时间的原因是:在刚开始加热时,温度变化迅速,波导的有效折射率变化也很快,从而导致微环谐振腔的谐振峰发生快速漂移,使得输出光强的下降时间很短;在加热一定时间以后,调制区的温度逐渐稳定,温度的升高速度逐渐减缓,当由于温度改变导致的有效折射率变化使得初始谐振峰逐渐漂移到下一级谐振峰时,由于折射率变换缓慢,使得这一变化也很缓慢,从而使得输出光强的上升时间比较长.

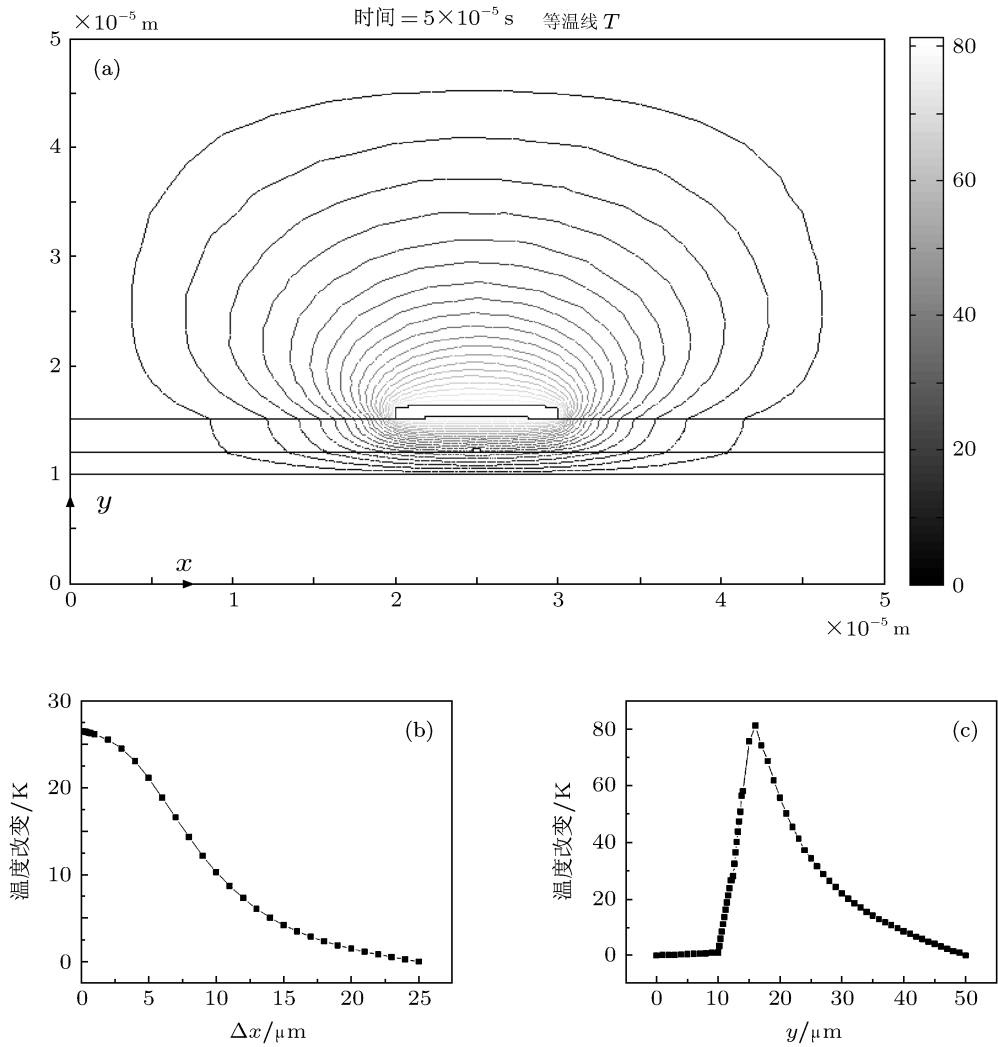


图5 加热电极后静态响应结果 (a) 稳态温度场分布; (b) 调制区中心水平方向温度分布; (c) 计算窗口中心竖直方向温度分布

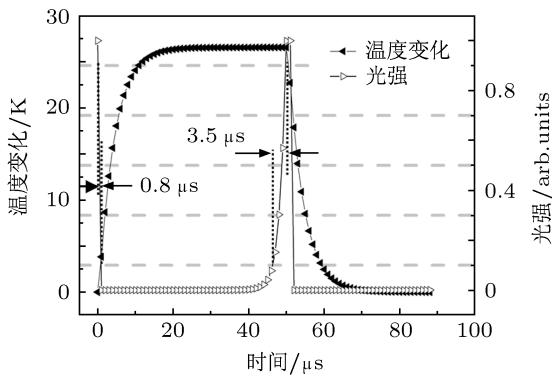


图6 50 μs 加热然后冷却的热响应曲线

基于以上的计算结果, 我们在第一级半径为 48 μm 和第二级半径为 50 μm 的微环谐振腔

上分别加热, 其加热功率和输出的波长如表 1 所示.

表 1 加热功率对输出波长的影响

	R1 加热功率			
R2 加热功率	0 W	0.03 W	0.06 W	0.10 W
0 W	1.54772	1.59752	1.57789	1.55046
0.03 W	1.5676	1.54851	1.59854	1.57314
0.06 W	1.58798	1.56839	1.54929	1.59365
0.10 W	1.61199	1.59473	1.57498	1.55034

从表 1 所得的输出波长与加热功率的关系可以看出, 在两个微环加热功率相同的情况下, 波谱红移量是随着加热功率的增加而增加的; 当第一级微环上加热功率大于第二级微环上的加热功率时, 波谱随着第二级微环上的加热功率的增加而逐渐红移; 当第一级微环上加热功率小于第二级微环上

的加热功率时,波谱随着第一级微环上加热功率的增加而逐渐蓝移.

## 5 结论

我们设计了一种基于 Vernier 效应的热光可调谐级联微环滤波器,通过理论分析,此种滤波器的

自由光谱范围和调谐范围可以达到 76.5 nm,而功耗仅仅为 103.1 mW. 滤波器的热响应速度为,上升时间 3.5  $\mu$ s,下降时间仅为 0.8  $\mu$ s. 并且发现两级微环上加热功率不同时,可以使输出波长发生红移或者蓝移,这可以使我们通过控制两级微环上的加热量来控制输出波长是向中心波长的长波方向移动,还是短波方向移动.

- 
- [1] Xu Q F, Fattal D, Beausoleil R G 2008 *Opt. Express* **16** 4309
- [2] Seung J C, Zhen P, Qi Y, Sang J C, Dapkus P D 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 106
- [3] Jin L, Li M Y, He J J 2010 *CLEO/QELS*, Poster Session II CJWA84
- [4] Claes T, Bogaerts W, Bienstman P 2010 *Opt. Express* **18** 22747
- [5] Soref R A 1993 *Proc. IEEE* **81** 1687
- [6] Magdalena S N, Liu T, Wang X, Roberto R P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **89** 07110
- [7] Park J, Lee T, Lee D, Kim S, Hwang W, Chung Y 2008 *IEEE Photonics Technology Letters* **20** 988
- [8] Lee H, Kim G, Kim S, Chung Y 2009 *CLEO/Pacific Rim Shanghai, China* pp1-2
- [9] Xu X J, Chen S W, Yu J Z, Tu X G 2009 *J. Optics A Pure and Applied Optics* **11** 015508
- [10] Poon J K S, Scheuer J, Mookhejea S, Paloczi G T, Huang Y Y, Yariv A 2004 *Opt. Express* **12** 90
- [11] Tian H, Zhang Y D, Wang H, Qiu W, Wang N, Yuan P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6400 (in Chinese) [田赫, 掌蕴东, 王号, 邱薇, 王楠, 袁萍 2008 物理学报 **57** 6400]
- [12] Liu Z X, Pei L, Qi C H, Peng W J, Ning T G, Zhao R F, Gao S 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8615 (in Chinese) [李卓轩, 裴丽, 祁春慧, 彭万敬, 宁提纲, 赵瑞峰, 高嵩 2010 物理学报 **59** 8615]
- [13] Cocorullo G, Della Corte F G, Rendina I 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 3338

# Theoretical analysis of a thermal-optical tunable filter based on Vernier effect of cascade microring resonators\*

Ren Guang-Hui Chen Shao-Wu<sup>†</sup> Cao Tong-Tong

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

(Received 16 March 2011; revised manuscript received 30 March 2011)

## Abstract

A thermal-optical tunable filter based on the Vernier effect of cascade microring resonator, which can expand the Free-Spectrum-Range (FSR) and the tuning range, is designed and simulated. The FSR of the filter with a radius of 48  $\mu\text{m}$  for the first order and 50  $\mu\text{m}$  for the second order microring can be expanded to 76.5 nm, which is at present the largest FSR to our best knowledge. A tuning range covering all of the above mentioned FSR can be reached under 103.1 mW heating power, which is also the largest one for silicon based thermal-optic tunable microring resonator filters. The response time, calculated by finite-element-method, of the designed tunable filter with 50  $\mu\text{m}$  radius ring is 3.5  $\mu\text{s}$  for the rise edge and 0.8  $\mu\text{s}$  for the fall edge.

**Keywords:** integrated optics, filters, cascade microrings, thermo-optic effect

**PACS:** 42.82.-m, 84.30.Vr, 78.20.N

---

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(Grant No. 2007CB613405) and the National Science Foundation of China(Grant Nos. 60877013,60837001,61021003).

<sup>†</sup> E-mail: swchen@semi.ac.cn