

doi:10.13756/j.gtxyj.2015.06.004

硅光子与硅基光电子专题

基于级联延迟干涉结构的可重构光学滤波器

李瑞菲,周林杰,陈建平

(上海交通大学 电子工程系 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室,上海 200240)

摘要:文章提出了一种基于多级级联延迟干涉结构的可重构光学滤波器,可实现滤波带宽的调节。该级联干涉结构可重构为两类滤波器:一类为单次延迟干涉器,通过增加延迟量可实现滤波周期和带宽的调节;另一类是多次延迟干涉器,通过改变级联级数和光开关的分光比可实现固定滤波周期的带宽调节。采用传输矩阵方法建立了该延迟干涉滤波器的理论模型并进行了模拟仿真。二次和三次延迟干涉器测试结果表明,阻带滤波带宽变化大于1/3个滤波周期。

关键词:光学器件;集成光子器件;可调光滤波器

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8788(2015)06-0016-04

Reconfigurable optical filters based on cascaded delay interferometer

Li Ruifei, Zhou Linjie, Chen Jianping

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper presents a configurable optical filter based on a multi-stage cascaded delay interferometer, which can be refigured as two types of filters to achieve the tuning of the filter bandwidth: single delay interferometer and multiple delay interferometer. The former tunes the filtering period and bandwidth by increasing the retardation and the other tunes the bandwidth of the constant filtering period by changing the number of the cascaded stages and the splitting ratio of the MZI switches. It builds a theoretical model of this delay interference filter by using the transfer matrix method and performs its simulation. The test results of the secondary and third delay interferometers show that the bandstop filter bandwidth can vary by over 1/3 filter period.

Key words: optical device; integrated phonic (optics) device; tunable optical filter

0 引言

光学滤波器是光通信网络和光信息处理系统中的基本元器件。比如,带阻滤波器是实现载波抑制、消除多通道干涉的重要组件^[1-2]。描述滤波器性能的主要参数有:消光比、矩阵系数以及波长和带宽的可调谐性。具有高消光比、高矩形系数并且带宽可调的光学滤波器是实现波分复用的重要器件,它可适用于不同的信号速率,应用起来更加灵活。

许多文献报道了各种可调滤波器的设计,如康奈尔大学通过调节微环的耦合系数,实现了带宽可调的微环滤波器^[3]。针对单个微环的矩形系数较低的问题,人们提出了高阶级联微环的滤波器结构^[4-5],级联微环虽然实现了高矩阵系数,但是每个微环尺寸都需要精确设计。文献[6-8]提出了基于硅基 MRR-MZI(微环谐振器-马赫曾德干涉仪)结构的滤波器,通过调节两个微环的谐振波长,可以实现波长和带宽的同时可调,并且有较高的消光比和

矩阵系数。

在微波光子的应用中,FIR(有限脉冲响应)滤波器因其稳定性、线性相位响应等特点,受到广泛关注^[9]。S. Liao等人提出了基于MZI的四段可编程FIR滤波器^[10],并在SOI(绝缘体上硅)材料上予以实现。H. Yu实现了多级级联MZI窄带FIR滤波器^[11]。P. Toliver提出了可以同时实现IIR(有限与无限脉冲响应)的滤波器^[12]。在本文中,我们提出了一种基于延迟干涉仪的多级可重构FIR滤波器,该滤波器具有良好的稳定性和较大的带宽调节范围,可应用于微波光子滤波。

1 滤波器结构

本文提出的可重构滤波器由多级延迟干涉仪级联构成。每级延迟干涉仪由 2×2 MZI光开关和连接开关的两根延迟波导构成,如图1(a)所示。波导采用脊型结构,参数如下:下包层 SiO_2 厚度为 $2 \mu\text{m}$,硅波导高度为 220nm ,刻蚀深度为 160nm ,

收稿日期:2015-09-13

基金项目:国家“九七三”计划资助项目(ID2011CB301700);国家“八六三”计划资助项目(2013AA014402);国家自然科学基金资助项目(61127016,61107041);教育部高等学校博士学科点专项基金(20130073130005)

作者简介:李瑞菲(1990-),女,山西运城人。硕士研究生,主要研究方向为硅光子器件。

上包层 SiO_2 厚度为 $2.3 \mu\text{m}$ 。为了减小波导损耗，延迟线波导采用 $3 \mu\text{m}$ 宽波导，仅在弯曲和与 MZI 开关相连时采用 $0.5 \mu\text{m}$ 宽的常规波导，以避免激发高阶模。延迟波导长度差第一级为 Δl (对应延迟量为 10 ps)，第二级为 $2\Delta l$ ，第三级为 $2^2 \Delta l$ ，以此类推，第 N 级为 $2^{N-1} \Delta l$ 。每根波导均集成了一个 PIN 二极管。当外部电压加载于 PIN 时，载流子注入到波导内，由于 FCD (载流子色散) 效应，波导的有效折射率会发生改变，从而实现了对波导相位的调控。每一级延迟干涉仪中的短波导均耦合一测试波导 (能量耦合比为 1.3%)，用于监控波导中的能量。MZI 光开关由一对 2×2 MMI (多模干涉仪) 构成，如图 1(b) 所示。MMI 长度为 $31.5 \mu\text{m}$ ，宽度为 $5 \mu\text{m}$ 。MZI 的有源臂长为 5.27 mm 。在 MZI 一臂上集成了 PIN 二极管，用于调节开关状态。该器件可以被用作 RTTDL (可重构真延迟线)，通过控制开关的状态，可以实现精度为 10 ps 、范围为 $0 \sim 1.27 \text{ ns}$ 的延迟^[13-14]。在本文中，我们通过控制级联开关的状态，使光通过不同路径进行干涉，从而实现不同的滤波特性。

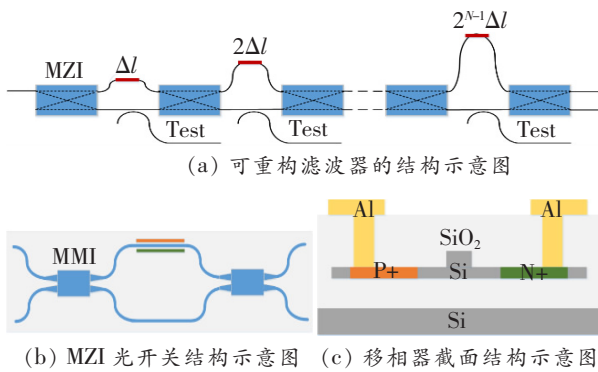


图 1 可重构滤波器的结构示意图

2 滤波器原理与仿真

我们采用传输矩阵的方法来描述光波在该级联结构中的传输。 N 级滤波器的传输矩阵 \mathbf{T}_N 可写为

$$\mathbf{T}_N = \begin{bmatrix} T_{11}^{(N)} & T_{12}^{(N)} \\ T_{21}^{(N)} & T_{22}^{(N)} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{n+1} \cdot \mathbf{D}_n \cdot \mathbf{M}_n \cdots \mathbf{D}_1 \cdot \mathbf{M}_1, \quad (1)$$

式中， \mathbf{M}_n 代表第 n ($n=1, 2, \dots, N$) 级 MZI 光开关的传输矩阵，可表达为

$$\mathbf{M}_n = \begin{bmatrix} c_n & -js_n \\ -js_n & c_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中， c_n 和 s_n 分别为 2×2 MZI 两输出波导的直通和耦合系数，对于无损耗耦合，根据能量守恒有 $c_n^2 + s_n^2 = 1$ ，MZI 两输出波导的分光比为 $c_n^2 : s_n^2$ ； \mathbf{D}_n 代表第 n 级延迟波导对的传输矩阵，可表示为

$$\mathbf{D}_n = \begin{bmatrix} a_n \cdot (z^{-1})^{2^{n-1}} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中， $z^{-1} = e^{-i\phi}$ ， ϕ 为单位延迟 $\Delta t = 10 \text{ ps}$ 引起的相位变化 (以短波导为参考)， $a_n = e^{-i\Delta\phi_n}$ 为长延迟波导的相移系数，图中 $\Delta\phi_n$ 为长延迟波导中由移相器引入的额外相移。

图 2 所示为采用多级延迟线级联构成的单次干涉和多次干涉的信号传输图。图中黑实线表示光的实际传输路径。

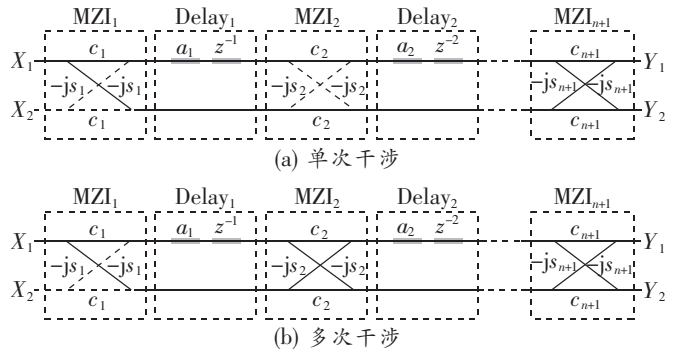


图 2 采用多级延迟线级联构成的单次干涉和多次干涉的 FIR 滤波器信号传输图

如图 2(a) 所示，在单次干涉中，光经由 MZI_1 后分为上下两路，其中一路沿参考臂传输，另一路经过了延迟线 $\text{Delay}_1, \text{Delay}_2 \dots$ ，最终两路光在 MZI_{n+1} 处发生干涉并输出。通过选择不同的延迟量，可以获得不同的滤波特性。第一级 Delay_1 的延迟量为 10 ps ，第二级 Delay_2 的延迟量为 20 ps ，第三级 Delay_3 的延迟量为 40 ps ，通过组合，可以实现一级 10 ps 延迟滤波，二级级联 30 ps 延迟滤波，或三级级联 70 ps 延迟滤波。在单次干涉滤波器中，我们仅靠延迟产生相位差，即传输矩阵中长臂相移系数 $a_n = 1$ 。对于单次干涉滤波器，光经过第一个 MZI 分光后，只在最后一个 MZI 处发生干涉，中间的 MZI 均为直通状态 (即 c_n 都为 1)，故影响滤波特性的参数只有总延迟量和第一级及最后一级 MZI 光开关的直通耦合系数 c_1 和 c_{n+1} 。

由式 (1)~(3) 可得到延迟量分别为 $10, 30$ 和 70 ps 时，输出端 Y_2 所对应的滤波器仿真特性，如图 3 所示，其中参数设置如表 1 所示。

表1 单次干涉滤波器仿真参数设置

仿真参数	延迟干涉仪级数		
	1级 (10 ps)	2级 (30 ps)	3级 (70 ps)
c_1	0.707	0.707	0.707
a_1	1	1	1
c_2	0.707	1	1
a_2		1	1
c_3		0.707	1
a_3			1
c_4			0.707

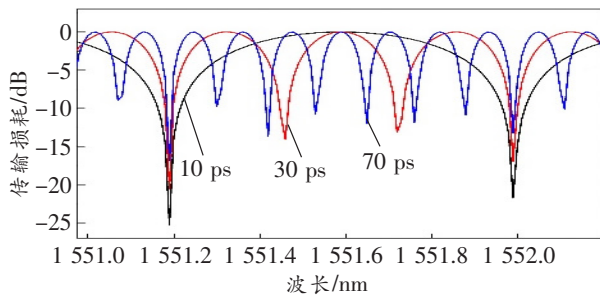


图3 单次延迟干涉滤波器的仿真频谱

可看到滤波带宽和FSR(自由频谱宽度)均与延迟量成反比关系。三种延迟量对应的带阻滤波3 dB带宽分别为0.268、0.091和0.040 nm,FSR分别为0.800、0.270和0.109 nm。

如图2(b)所示,多级延迟线结构也可以重构为多次干涉滤波器。输入光经过MZI₁分成两路,经过第一级延迟波导形成相位差,在MZI₂中发生干涉,之后再经过下一级延迟波导再干涉,以此类推,经过N级后最后从MZI_{n+1}中输出。在多次干涉滤波器中,光经过了多次干涉,滤波频谱更加复杂。为了探索影响滤波特性的参数,我们先对二次干涉延迟滤波器进行分析。

输入光从X₁端进入,二次干涉滤波器的输出端信号为

$$\begin{bmatrix} Y_1^{(2)} \\ Y_2^{(2)} \end{bmatrix} = T_2 \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11}^{(2)} & T_{12}^{(2)} \\ T_{21}^{(2)} & T_{22}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11}^{(2)} \\ T_{21}^{(2)} \end{bmatrix},$$

代入式(1)~(3),可得:

$$Y_1^{(2)} = T_{11}^{(2)} = c_1 c_2 c_3 a_1 a_2 z^{-3} - s_1 s_2 c_3 a_2 z^{-2} - c_1 s_2 s_3 a_1 z^{-1} - s_1 c_2 s_3, \quad (4)$$

由该输出传递函数可看出,该滤波器为三阶FIR滤波器,滤波特性由 c_1 、 c_2 、 c_3 、 a_1 和 a_2 5个参数决定。滤波器每增加一级,会增加两个参数 a_n 和 c_n 。因此三次干涉滤波器受7个参数影响,四次干涉滤波器受9个参数影响。我们通过仿真优化得到了较为合适的参数值,如表2所示。

表2 多次干涉滤波器仿真参数设置

仿真参数	延迟干涉仪级数		
	2级	3级	4级
c_1	0.632	0.894	0.775
a_1	1	1	1
c_2	0.316	0.316	1
a_2	1	1	1
c_3	0.548	0.316	0.316
a_3		1	1
c_4		0.447	0.225
a_4			1
c_5			0.316

图4是依照以上参数,从输出端Y₂得到的二次、三次和四次延迟干涉滤波器的仿真结果。滤波的FSR为0.8 nm,带宽分别为0.265 5、0.124 5和0.062 0 nm,阻带消光比为15 dB。从二次到四次干涉滤波器,3 dB带宽减小了0.2 nm,并且有更陡峭的滤波边缘。三次干涉滤波器有大约1.5 dB的通带内抖动,而四次干涉滤波器的抖动为4 dB左右,这是由于滤波器的干涉级数越高,参数之间的相互作用越严重。

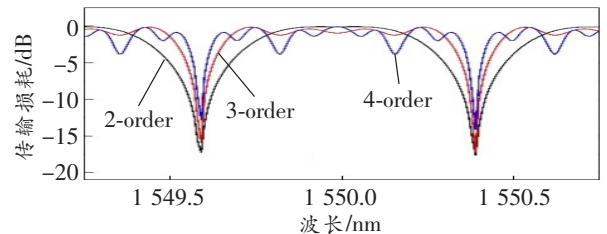


图4 多次延迟干涉滤波器的仿真频谱

3 多次干涉滤波器实验结果

在滤波器测试中,每一级参考臂都耦合一测试波导(Test),我们通过开关后测试端的输出能量来判断光开关的状态。首先,依次调节光开关电压,使光在器件中沿参考臂传播,我们将光源从X₁输入,此时测试波导的输出能量最高。然后依倒序按照表2中每级光开关的耦合系数对应值调低测试波导输出能量,使MZI开关达到预想的分光比。由于 $a_n = 1$,长臂相位不需要调节。但是由于工艺误差,延迟波导会有一定的相位差,此时我们适当调节长臂电压来进行补偿。图5和图6分别为从MZI₃后测试端输出的二次干涉和从MZI₄后测试端输出的三次干涉滤波器的实验传输谱。滤波FSR为0.8 nm,二次干涉滤波器的阻带带宽为0.546 nm,三次干涉滤波器的阻带带宽为0.210 nm,实现了同一滤波周期下的带宽调节,带宽变化量大于1/3FSR。三次

干涉滤波的通带内抖动约为 5 dB,阻带消光比在 1 555.5~1 558.5 nm 波长内达到 40 dB 以上。

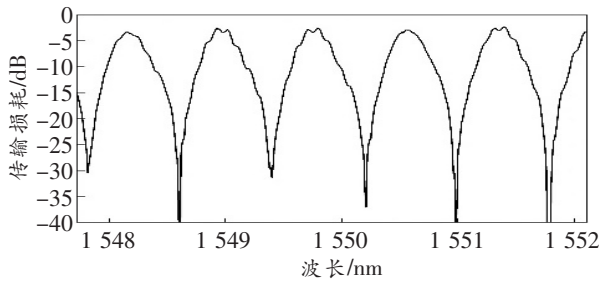


图 5 二次延迟干涉滤波器实验频谱图

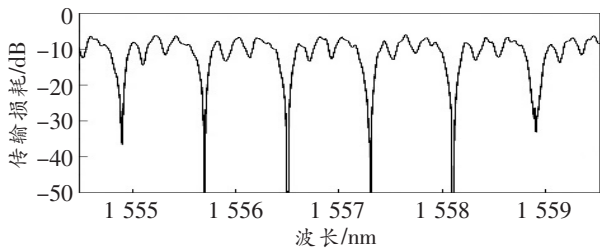


图 6 三次延迟干涉滤波器实验频谱图

4 结束语

本文利用硅基集成多级级联延迟干涉结构实现了两种带宽可调的光学滤波器。一种滤波器通过改变延迟时间,使滤波周期和带宽实现大幅变化,该方法具有设计简单、稳定性高的特点;另一种滤波器通过多次级联干涉,调节分光系数,可重构滤波传输谱,该方法的优点是可以实现相同周期的带宽可调滤波,并且可以得到陡峭的边带。

参考文献:

[1] Madsen C K, Cappuzzo M, Chen E, et al. A tunable ultra-narrowband filter for subcarrier processing and optical monitoring [C]// Optical Fiber Communication (OFC) 2004. Los Angeles, USA: IEEE Press, 2004: 431-438.

[2] Capmany J, Ortega B, Pastor D. A tutorial on microwave photonic filters [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(1): 201-229.

[3] Chen L, Sherwood-Droz N, Lipson M. Compact bandwidth-tunable microring resonators [J]. Opt Lett, 2007, 32(15): 3361-3363.

[4] Ong J R, Kumar R, Mookherjee S. Ultra-High-Contrast and Tunable-Bandwidth Filter Using Cascaded High-Order Silicon Microring Filters [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(16): 1543-1546.

[5] Hu T, Wang W J, Qiu C, et al. Thermally Tunable Filters Based on Third-Order Microring Resonators for WDM Applications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(6): 524-526.

[6] Orlandi P, Morichetti F, Strain M J, et al. Photonic Integrated Filter With Widely Tunable Bandwidth [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(5): 897-907.

[7] Orlandi P, Ferrari C, Strain M J, et al. Reconfigurable silicon filter with continuous bandwidth tunability [J]. Opt Lett, 2012, 37(17): 3669-3671.

[8] Ding Y, Pu M, Liu L, et al. Bandwidth and wavelength-tunable optical bandpass filter based on silicon microring-MZI structure [J]. Opt Express, 2011, 19(7): 6462-6470.

[9] Rasras M S, Gill D M, Patel S S, et al. Demonstration of a fourth-order pole-zero optical filter integrated using CMOS processes [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(1): 87-92.

[10] Liao S, Ding Y, Peucheret C, et al. Integrated programmable photonic filter on the silicon-on-insulator platform [J]. Opt Express, 2014, 22(26): 31993-31998.

[11] Yu H, Chen M, Li P, et al. Silicon-on-insulator narrow-passband filter based on cascaded MZIs incorporating enhanced FSR for downconverting analog photonic links [J]. Opt Express, 2013, 21(6): 6749-6755.

[12] Toliver P, Menendez R, Banwell T, et al. A Programmable Optical Filter Unit Cell Element for High Resolution RF Signal Processing in Silicon Photonics [C]// Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, 2010 Conference on (OFC/NFOEC). San Diego, USA: IEEE Press, 2010: 1-3, OWJ4.

[13] Chen Z, Zhou L, Chen J. Analysis of a Silicon Reconfigurable Feed-Forward Optical Delay Line [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(1): 1-11.

[14] Xie J, Zhou L, Li Z, et al. Seven-bit reconfigurable optical true time delay line based on silicon integration [J]. Opt Express, 2014, 22(19): 22707-22715.