

# 光学学报

## 基于级联啾啾亚波长光栅辅助反向耦合器的超宽带可调滤波器

廖莎莎<sup>1,2\*</sup>, 包航<sup>1</sup>, 冯玉婷<sup>1</sup>, 黄琮<sup>1</sup>, 张伍浩<sup>1</sup>, 赵帅<sup>1</sup>, 刘真伟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065;

<sup>2</sup>上海交通大学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** 宽带、可调滤波器被认为是突破信息处理技术瓶颈的关键器件之一,可以有效提升信息网络的传输容量和频谱效率。提出了一种基于级联啾啾亚波长光栅辅助反向耦合器的超宽带可调滤波器。该滤波器采用绝缘体上硅材料,通过在反向耦合器中使用亚波长光栅和引入啾啾实现超宽带滤波,通过级联反向耦合器实现带宽可调。分析了反向耦合器的传输函数,提出了提高器件带宽的方法。采用单个反向耦合器结构可以实现带宽为 64.07 nm,旁瓣抑制比大于 10.5 dB,插入损耗约为 0.60 dB 的超宽带滤波器。通过级联该结构,可实现插入损耗为 1 dB,带宽调节范围为 44.30~48.92 nm 的宽带可调滤波器。该宽带可调滤波器具有超大带宽、可调谐、矩形度高、尺寸小和可实现无中断传输等优势,能被广泛应用于光滤波和信息传输等领域中。

**关键词** 光栅; 集成光学器件; 光滤波器; 亚波长光栅

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1405003

### Ultra-Broadband Tunable Filter Based on Cascaded Chirped Subwavelength Grating Assisted Contra-Directional Coupler

Liao Shasha<sup>1,2\*</sup>, Bao Hang<sup>1</sup>, Feng Yuting<sup>1</sup>, Huang Cong<sup>1</sup>, Zhang Wuhao<sup>1</sup>, Zhao Shuai<sup>1</sup>, Liu Zhenwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;*

<sup>2</sup>*State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*

**Abstract** The broadband tunable filter is considered as one of the key equipment to break the bottleneck of the information processing technology, which can effectively improve the transmission capacity and spectrum efficiency of information networks. An ultra-broadband tunable filter based on cascaded chirped subwavelength grating assisted contra-directional coupler is proposed. The filter is based on silicon on insulator. By using subwavelength grating and introducing chirp in the contra-directional coupler, an ultra-broadband filter is obtained. The bandwidth tunability of the proposed filter is realized by cascading contra-directional couplers. The transmission function of the contra-directional coupler is analyzed, and some feasible methods to enlarge the bandwidth of the filter are proposed. The ultra-broadband filter with a bandwidth of 64.07 nm, a sidelobe suppression ratio of more than 10.5 dB and insertion loss of about 0.60 dB can be realized by using a single contra-directional coupler. The ultra-broadband tunable filter with an insertion loss of 1 dB and a bandwidth tuning range of 44.3~49.92 nm can be realized by cascading contra-directional couplers. The ultra-broadband tunable filter has the advantages of large bandwidth, tunability, high similarity with rectangular shape, small size, and uninterrupted transmission, which can be widely used in optical filtering and information transmission.

**Key words** gratings; integrated optical devices; optical filter; subwavelength grating

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-01-20; 录用日期: 2022-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(61801063)、重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0597)、上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金(2021GZKF005)

通信作者: \*liaoss@cqupt.edu.cn

# 1 引言

随着互联设备和信息流量的爆炸性增长,信息处理技术逐渐到达瓶颈。为实现更快的信息处理速度和更高的信息传输容量,与互补金属半导体(CMOS)工艺兼容的硅基集成光子结构<sup>[1-7]</sup>开始得到广泛的研究和应用。其中,硅基集成可调宽带滤波器是满足日益增长的带宽需求和更高频谱效率的关键设备之一。为实现更大的滤波带宽和更强的可调性,许多方法已经被提出,包括微环谐振器(MRR)<sup>[8-10]</sup>、马赫-曾德尔干涉仪(MZI)<sup>[11-12]</sup>和波导布拉格光栅<sup>[13-15]</sup>等。Li等<sup>[8]</sup>提出了基于石墨烯-硅波导的级联微环方案,该方案通过适当调整石墨烯的费米能级和路径相位差,可根据需求形成可调带宽,最终实现了最大带宽为 6.3 nm,带宽调节范围为 2.7~6.3 nm 的滤波器。微环谐振器虽然结构简单、尺寸小,但是固有的带宽延时积严重限制了其能实现的最大带宽。Orlandi等<sup>[11]</sup>提出了在 MZI 一臂上嵌入两个级联 MRR 的滤波器方案,该方案通过调节 MRR 和 MZI 另一臂的相位可以实现具有较大带宽和带宽可调的滤波器,其最大带宽为 1.44 nm,带宽调节范围为 0.16~1.44 nm。然而,该类方案存在自由频谱范围(FSR),带宽也较小。为实现无 FSR 的宽带可调滤波器,波导布拉格光栅被采用。Jiang等<sup>[13]</sup>提出了基于级联非对称多模布拉格光栅的可调滤波器方案,该方案通过热光调制器控制光栅的反射谱来实现带宽的调节,实现的最大带宽为 13 nm,带宽调节范围为 1~13 nm。该方案虽然能实现具有较大带宽且无 FSR 的传输谱,但是该可调滤波器为反射结构,而反射信号需要额外的分离结构才能导出,这无疑增加了系统的复杂度。然而,光栅辅助反向耦合器作为多端口的波长选择性结构,既能实现宽带无 FSR 的滤波谱,又能实现反射信号异端口输出。Borojerdj等<sup>[14]</sup>提出了级联反向耦合器的可调滤波器方案,通过控制反

向耦合器的通带波长范围,可实现带宽可调,最终实现了最大滤波带宽为 11.7 nm,带宽调节范围为 1.1~11.7 nm 的滤波器。为进一步增大最大带宽,研究人员进行了多种尝试。Yun等<sup>[15]</sup>提出了基于亚波长光栅(SWG)的反向耦合器方案,实现的滤波器的最大带宽为 32.60 nm。Hammood等<sup>[16]</sup>提出了基于周期啁啾的反向耦合器方案,其最大带宽达到了 88.10 nm,但器件的长度为 4.7 mm,故难以大规模集成。

为克服现有方案带宽小、存在 FSR 和结构复杂等缺点,本文提出了一种基于级联啁啾 SWG 辅助反向耦合器(SWG-CDC)结构的滤波器方案。该方案采用反向耦合器结构,通过 SWG 和啁啾设计,实现无 FSR 的超宽带滤波器。此外,采用级联两组啁啾 SWG-CDC 结构,实现宽带可调滤波器。本文推导了反向耦合器的传输函数,分析了 SWG 结构和啁啾量对滤波器带宽的影响,确定了最优的结果。最终,实现了带宽约为 64 nm 的超宽带滤波器和带宽调节范围约为 4.6 nm 的可调宽带滤波器。

# 2 光栅辅助反向耦合器的工作原理

所提的超宽带滤波器的基本结构为啁啾 SWG 辅助反向耦合器。光栅辅助反向耦合器的基本结构示意图如图 1 所示,通常由两根宽度( $W_1$ 和 $W_2$ )不同的波导组成,当两根波导传播常数 $\beta_i(i=1,2)$ 相差较大时可以有效抑制波导间同向的模式耦合。刻蚀在波导两侧的周期性布拉格光栅提供了介电扰动,在相位匹配条件下,波导间会出现具有波长选择性的反向耦合。当光由输入端口(Input)输入时,满足相位匹配条件的波长将经由下载端口(Drop)反向耦合输出,而其余波长的光将沿着直通端口(Thr)直接输出。因此,反向耦合器中无需环形器等器件来分离反射信号,谱线也具有无 FSR 的优点。

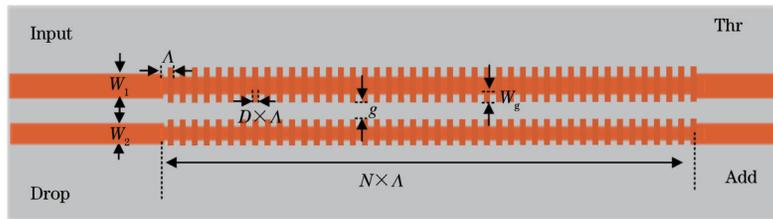


图 1 光栅辅助反向耦合器结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of grating-assisted contra-directional coupler

假设反向耦合器中波导的宽度为  $W_1$  和  $W_2$ , 波导之间的间距为  $g + W_g$ , 光栅齿宽为  $W_g$ , 光栅周期为  $\Lambda$ ,

占空比为  $D$ , 光栅周期个数为  $N$ 。根据耦合模理论, 此时反向耦合器服从的边界条件的一般解为

$$A(Z) = e^{i\frac{\Delta\beta}{2}Z} \frac{s \times \cosh[s(L-Z)] + i(\Delta\beta/2) \times \sinh[s(L-Z)]}{s \times \cosh(s \times L) + i(\Delta\beta/2) \times \sinh(s \times L)} A(0), \tag{1}$$

$$B(Z) = e^{-i\frac{\Delta\beta}{2}Z} \frac{-i \times \kappa^* \times \sinh[s \times (L-Z)]}{s \times \cosh(s \times L) + i(\Delta\beta/2) \times \sinh(s \times L)} A(0), \tag{2}$$

式中:  $L$  为光栅长度;  $Z$  为光栅位置 ( $0 \leq Z \leq L$ );  $A(Z)$  和  $B(Z)$  分别为  $W_1$  和  $W_2$  波导中模式的振幅;  $\kappa$  为耦合系数, 表示在周期性介质微扰的作用下两个模式之间的耦合程度;  $A(0)$  为  $W_1$  波导在  $Z=0$  处的光场振幅;  $\kappa^*$  为耦合系数  $\kappa$  的共轭;  $s$  与耦合系数  $\kappa$  和传播常数差  $\Delta\beta$  有关。  $\kappa$ 、 $s$  和  $\Delta\beta$  可分别表示为

$$\kappa = \frac{\omega}{4} \iint E_k^*(x, y) \times \epsilon_m(x, y) \times E_n(x, y) dx dy, \quad (3)$$

$$s^2 = |\kappa|^2 - \left( \frac{\Delta\beta}{2} \right)^2, \quad (4)$$

$$\Delta\beta = \beta_1 + \beta_2 - \frac{m2\pi}{\Lambda} = (n_1 + n_2) \left( \frac{2\pi}{\lambda} - \frac{2\pi}{\lambda_0} \right), m=1, \quad (5)$$

式中:  $\epsilon_m$  为周期性介质微扰的第  $m$  个傅里叶分量;  $\beta_i = 2\pi n_i / \Lambda$  ( $i=1, 2$ ) 为波导中模式的传播常数;  $E_k^*$  和  $E_n$  分别为耦合系统中波导横截面上第  $k$  个模式和第  $n$  个模式的电场分布;  $n_1$  和  $n_2$  为两个波导中模式的有效折射率;  $\lambda$  为输入光波长;  $\lambda_0$  为反向耦合器的中心波长。根据式(1)、(2)可求得在  $Z=0$  和  $Z=L$  区域中下载端的传输效率  $\eta$ , 即

$$\eta = \frac{|B(0)|^2}{|A(0)|^2} = \frac{|\kappa|^2 \times \sinh^2(s \times L)}{s^2 \times \cosh^2(s \times L) + (\Delta\beta/2)^2 \times \sinh^2(s \times L)}, \quad (6)$$

式中:  $B(0)$  为  $W_2$  波导在  $Z=0$  处的光场振幅。

在相位匹配条件下, 实现反向耦合的光栅周期为

$$\Lambda = \frac{m\lambda_0}{n_1 + n_2}, m=1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

传播常数差可以定义为

$$\Delta\beta = 4|\kappa|_0. \quad (8)$$

通过式(5)和式(8), 可以得到反向耦合带宽  $\Delta\lambda$  为

$$\Delta\lambda = \frac{2\lambda_0^2}{\pi(n_1 + n_2)} |\kappa|_0. \quad (9)$$

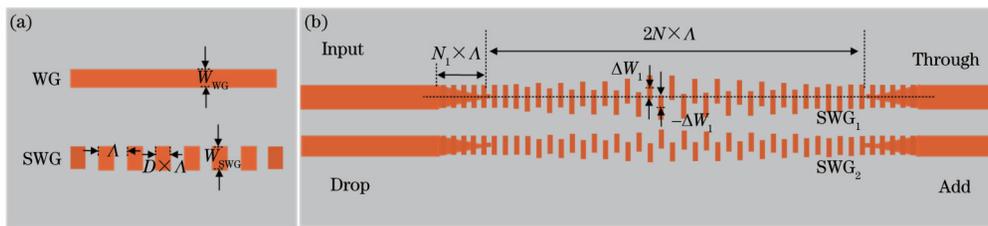


图3 器件结构示意图。(a) WG和SWG;(b) SWG辅助反向耦合器

Fig. 3 Structural diagrams of devices. (a) WG and SWG; (b) SWG-assisted contra-directional coupler

WG与SWG的对比如图4所示, 其中WG波导的宽度  $W_{WG}$  为500 nm, SWG波导的宽度  $W_{SWG}$  为500 nm, 周期  $\Lambda$  为206 nm, 占空比  $D$  为0.5。将SWG波导替换为等效均匀介质波导, 并使用有限差分本征模(FDE)求解器计算得到SWG和WG的有效折射率,

通过式(1)、(2)计算得到的反向耦合器传输特性  $T_{Thr} = |A(L)|^2 / |A(0)|^2$  和  $T_{Drop} = |B(0)|^2 / |A(0)|^2$  如图2所示。此时, 波导中模式的有效折射率  $n_1$  和  $n_2$  分别为2.52和2.24, 光栅周期  $\Lambda$  为326 nm, 光栅周期个数  $N$  为1000, 耦合系数  $\kappa$  为  $0.026 \text{ cm}^{-1}$ 。图2中虚线和实线分别为反向耦合器的透射谱和下载谱, 其中下载谱带宽约为8.8 nm, 与通过式(9)计算得到的带宽一致, 而旁瓣抑制比仅为1.3 dB。

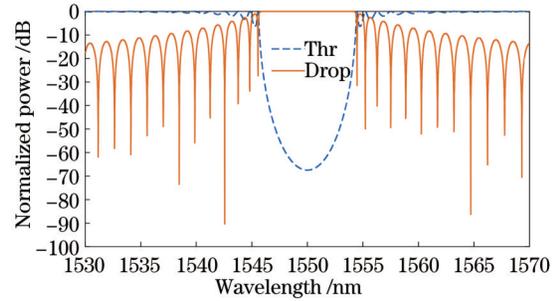


图2 光栅辅助反向耦合器的传输谱

Fig. 2 Transmission spectra of grating-assisted contra-directional coupler

### 3 基于啁啾亚波长光栅反向耦合器的超宽带滤波器设计

由式(9)可知, 反向耦合器的带宽与中心波长  $\lambda_0$  和耦合系数  $\kappa$  正相关, 与波导中模式的有效折射率  $n_i$  负相关, 故为增加反向耦合器的带宽可以采用SWG结构<sup>[17-18]</sup>以增大耦合系数  $\kappa$  同时减小有效折射率  $n_{eff}$ 。

条波导(WG)与SWG波导的结构示意图如图3(a)所示, 其中SWG由亚波长尺寸的Si和SiO<sub>2</sub>材料周期性排列形成。根据有效介质理论, 由不同材料在亚波长尺寸下组成的复合介质可以被近似认为是具有等效折射率  $n_{eq}$  的均匀介质,  $n_{eq}$  的表达式为

$$n_{eq}^2 = D \times n_{Si}^2 + (1 - D) \times n_{SiO_2}^2, \quad (10)$$

式中:  $D = L_{Si} / \Lambda$  为占空比;  $n_{Si}$  和  $n_{SiO_2}$  分别为Si和SiO<sub>2</sub>的材料折射率。

如图4(a)所示。其中, WG在1550 nm波长下的有效折射率约为2.45, SWG在1550 nm波长下的有效折射率约为1.68。从图4(a)中可以看出, 在整个波长范围内SWG的有效折射率都比WG小。在1550 nm波长下, WG和SWG波导横截面中心处沿波导宽度方

向(y)的电场分布图如图 4(b)所示。其中,虚线为 WG 波导模式的电场分布曲线,长实线和短实线分别为 SWG 波导模式在 Si 和 SiO<sub>2</sub> 区域处的电场分布曲线。可以明显看出,SWG 中电场强度 |E<sub>y</sub>| 明显大于 WG,因此 SWG 波导通过式(3)计算得到的耦合系数会更大,使用 SWG 波导构建反向耦合器也会具有更大的带宽。

使用 SWG 结构设计的反向耦合器(SWG-CDC)如图 3(b)所示。通过长度为 N<sub>1</sub>×Λ,宽度由 W<sub>1</sub>(W<sub>2</sub>) 线性减小到 100 nm 的锥形波导实现条波导模式到

SWG 波导模式的绝热转换。在均匀光栅情况下,反向耦合器的反射谱线会存在相当大的旁瓣,引起串扰等问题。为抑制旁瓣,可以在垂直于 SWG 的方向上施加一个高斯切趾函数,即 ΔW<sub>i</sub>(i)=ΔW<sub>i</sub>×exp{-2[α(i-0.5N)/N]<sup>4</sup>} (i=1,2),其中 ΔW<sub>1</sub> 和 ΔW<sub>2</sub> 分别是 SWG<sub>1</sub> 光栅和 SWG<sub>2</sub> 光栅在纵向位置上的最大偏置,α 为切趾强度。通过多次仿真优化后,可得如图 5 所示的传输谱线,此时 SWG-CDC 的参数为 W<sub>1</sub>=560 nm, W<sub>2</sub>=420 nm, g=220 nm, N<sub>1</sub>=100, N=1600, Λ=206 nm, D=0.55, ΔW<sub>1</sub>=60 nm, ΔW<sub>2</sub>=40 nm, α=1.94。

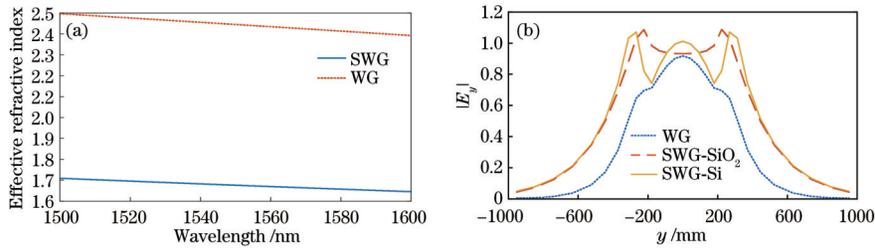


图 4 WG 和 SWG 的对比。(a)有效折射率;(b)电场强度分布

Fig. 4 Comparison of WG and SWG. (a) Effective refractive index; (b) distribution of electric field intensity

图 5 为仿真得到的 SWG-CDC 的传输谱,其中虚线为直通端的输出谱线,实线为下载端的输出谱线。该结构下载端的传输谱具有的最大带宽为 44.64 nm,旁瓣抑制比大于 12.7 dB,形状因子(3 dB 带宽与 10 dB 带宽的比值)为 0.99,插入损耗小于 0.35 dB,带内纹波(通带内传输强度最大值与最小值之比)小于 0.5 dB。

为进一步增加反向耦合器的传输带宽,根据式(9),可以通过改变中心波长 λ<sub>0</sub> 的方式来增加带宽。由

于中心波长 λ<sub>0</sub> 与光栅周期 Λ 正相关,因此增加光栅周期 Λ 能一定程度上增加反向耦合器的滤波带宽。当 SWG-CDC 结构的周期由 206 nm 增加至 211 nm 时,中心波长红移约 32 nm,此时带宽约增加 1.73 nm。可以发现,直接增加周期对带宽的提升较小。为实现更大的滤波带宽,还可以通过对光栅周期叠加啁啾。啁啾后的光栅周期变为 Λ(N)=Λ+ΔΛ,其中 ΔΛ=C×N, C 为啁啾率,Λ(N) 所对应的中心波长为 λ<sub>0</sub>(N)。相较于通过增加周期的方式来改变中心波长 λ<sub>0</sub>,啁啾引起的中心波长变化对带宽的提升更显著。此时直通端锥形转换器的周期也应相应地变为 Λ+ΔΛ。

叠加啁啾后的 SWG-CDC 的参数较上述 SWG-CDC 有所改变,即 W<sub>1</sub>=560 nm, W<sub>2</sub>=420 nm, g=208 nm, N<sub>1</sub>=100, N=1700, Λ=206 nm, D=0.5, ΔW<sub>1</sub>=48 nm, ΔW<sub>2</sub>=40 nm, 仿真得到的传输谱线如图 6 所示。图 6(a) 为不同啁啾率 C 下载端的传输谱线。当啁啾率 C 为 0 时,下载端传输谱线的中心波长为 1522 nm,带宽为 36.1 nm。随着啁啾率 C 的增大,下载端传输谱线的中心波长发生红移,带宽也随之增大。当啁啾率 C 为 7.06×10<sup>-3</sup> nm 时,下载端传输谱线

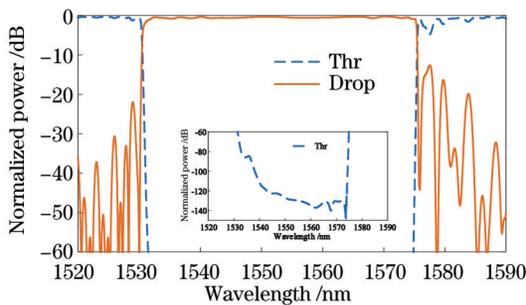


图 5 SWG-CDC 的传输谱线

Fig. 5 Transmission spectra of SWG-CDC

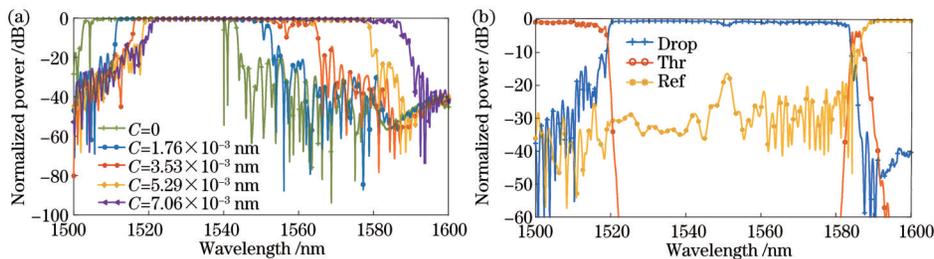


图 6 啁啾 SWG-CDC 的传输谱。(a)下载端谱线随 C 的变化;(b) C=5.88×10<sup>-3</sup> nm 时滤波器的传输谱

Fig. 6 Transmission spectra of chirped SWG-CDC. (a) Spectrum of drop port varying with C; (b) transmission spectra of filter when C is 5.88×10<sup>-3</sup> nm

的中心波长为 1554 nm, 带宽为 66.2 nm。在该啁啾率下, 由于大于 1589 nm 的光信号会在波导中形成布拉格反射, 因此下载端谱线的带宽并不会随着啁啾率的增加而继续增加, 即 SWG-CDC 的最大带宽约为 66 nm。权衡形状因子、旁瓣抑制比等多种参数后, 发现当啁啾率  $C$  为  $5.88 \times 10^{-3}$  nm 时, SWG-CDC 滤波效果最优, 其传输谱线如图 6(b) 所示, 其中带有圆圈的曲线为直通端的传输谱线, 带有十字符号的曲线为下载端的传输谱线, 带有星号的曲线为反射端的传输谱线。下载端传输谱线的中心波长为 1551.6 nm, 带宽为 64.07 nm, 形状因子约为 0.98, 旁瓣抑制比大于 10.5 dB, 插入损耗约为 0.6 dB, 带内纹波约为 1.2 dB。

#### 4 基于级联反向耦合器的可调滤波器

带宽可调滤波器无疑能提升网络中的频谱利用率。为实现带宽可调, 可将两个啁啾 SWG-CDC 进行级联, 其结构示意图如图 7 所示。该滤波器由两个啁啾 SWG-CDC 通过波导交叉级联组成, 上方和下方啁啾 SWG-CDC 镜像对称, 啁啾 SWG-CDC<sub>1</sub> 的 Drop 端口和 Add 端口分别与啁啾 SWG-CDC<sub>2</sub> 的 Add 端口和

Drop 端口相连。与传统的环形连接相比, 这样的连接方式可以抑制位于通带边缘处光信号在环内的谐振。假设波长分别为  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  和  $\lambda_4$  的光信号输入 Input 端口, 其中波长为  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  的光信号满足啁啾 SWG-CDC<sub>1</sub> 的相位匹配条件, 故波长为  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  的光信号被反向耦合, 其余波长的光由 Through 端口输出。然后, 波长为  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  的光信号通过波导交叉传输到啁啾 SWG-CDC<sub>2</sub> 的耦合区中。最后, 满足啁啾 SWG-CDC<sub>2</sub> 相位匹配条件的波长为  $\lambda_3$  的光信号被反向耦合, 由 Drop 端口输出, 而波长为  $\lambda_2$  的光信号直接通过 SWG-CDC<sub>2</sub> 的耦合区, 再次经过交叉波导区域, 由可调滤波器的 Through 端口输出。该滤波器通过将不满足相位匹配条件的光信号重新路由至 Through 端口输出, 可实现无中断传输特性, 即当调节一个通道的中心波长或者带宽时并不会干扰其他任何波长通道内的数据传输, 进一步提升了频谱效率。为增加滤波器的带宽调节范围, 采用的两个啁啾 SWG-CDC 具有不同的周期, 啁啾 SWG-CDC<sub>1</sub> 和啁啾 SWG-CDC<sub>2</sub> 的周期 ( $\Delta_1$  和  $\Delta_2$ ) 分别为 209 nm 和 206 nm。

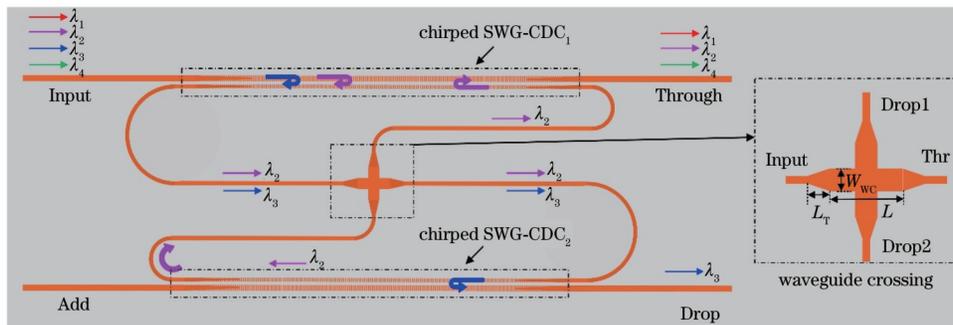


图 7 可调滤波器结构示意图

Fig. 7 Structural diagram of tunable filter

图 7 右侧插图为波导交叉<sup>[19]</sup>的结构示意图和相关结构参数, 其中  $L=9.3 \mu\text{m}$ ,  $W_{wc}=1.9 \mu\text{m}$ ,  $L_T=2.5 \mu\text{m}$ 。该波导交叉的传输谱如图 8 所示, 其中实线和虚线分别为 Thr 端和 Drop1 端的传输曲线, 插图为 Thr 端传输曲线的放大图。可以发现, 波导交叉的传输损耗约为 0.15 dB, 串扰小于 65 dB。

由于滤波器的传输谱是由两个啁啾 SWG-CDC 结构的传输谱叠加形成的, 因此加热啁啾 SWG-CDC

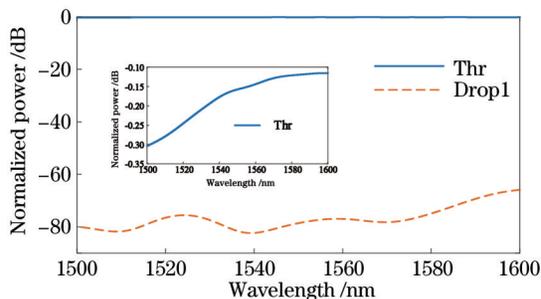


图 8 波导交叉的传输谱线

Fig. 8 Transmission spectra of waveguide crossing

结构可以改变其传输谱的位置, 进而实现可调滤波器的带宽调节。可调滤波器的仿真传输谱线如图 9 所示。图 9(a) 为啁啾 SWG-CDC<sub>1</sub> 或啁啾 SWG-CDC<sub>2</sub> 均未加热情况下的传输谱, 实线和虚线分别代表下载端和直通端的传输谱, 此时下载端传输谱的带宽为 46.57 nm, 形状因子约为 0.97, 传输损耗约为 1 dB, 带内纹波约为 1.2 dB, 旁瓣抑制比大于 6.8 dB。图 9(b) 为对不同 SWG-CDC 加热时滤波器的传输谱。其中, 带有菱形的曲线为啁啾 SWG-CDC<sub>1</sub> 升温 50 °C 时滤波器的下载端频谱, 此时啁啾 SWG-CDC<sub>1</sub> 的下载谱红移使得滤波器的带宽减小为 44.30 nm。带有圆形的曲线为啁啾 SWG-CDC<sub>2</sub> 升温 50 °C 时滤波器的下载端谱线, 此时滤波器的带宽增加为 48.92 nm。因此, 可调滤波器的带宽变化范围为 44.30~48.92 nm。

所提的基于单个反向耦合器的滤波器方案与以往的宽带滤波器方案性能比较如表 1 所示。由表 1 可知, 所提的超宽带滤波器的带宽为 64.07 nm, 器件长度仅约为 400  $\mu\text{m}$ 。文献 [16] 在波导光栅辅助反向耦合器的基础上同样采用啁啾方式实现了 88.1 nm 的滤波带

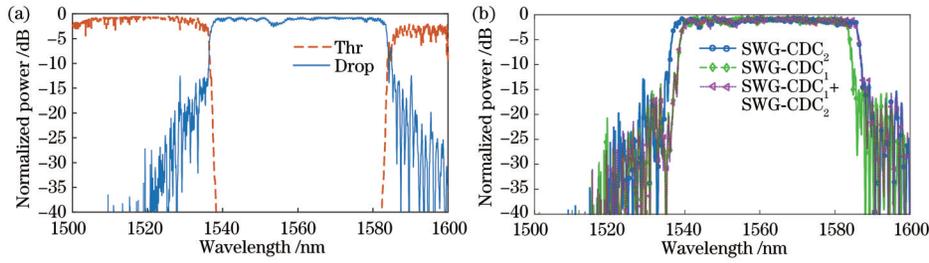


图 9 可调滤波器传输谱线。(a)未加热啁啾 SWG-CDC 时的谱线;(b)啁啾 SWG-CDC 升温 50 °C 时的谱线

Fig. 9 Transmission spectra of tunable filter. (a) Spectra of unheated chirped SWG-CDCs; (b) spectra of chirped SWG-CDCs when temperature increases 50 °C

宽,但为了实现平坦通带和大消光比,该结构必须采用足够小的啁啾率,此时器件长度达到了 4.7 mm。相比之下,所提滤波器在尺寸上有很大优势。表 2 比较了所提可调滤波器方案与其他可调滤波器方案。可以发现,所提可调滤波器同样以相对较小的尺寸(400 μm ×

48 μm)实现了较大的滤波带宽(48.92 nm)。所提方案的带宽可调范围(4.62 nm)相对较小,这是因为 SWG 相较直波导具有更低的热光系数,通过增加 SWG 占空比和增大温度调节范围可以在一定程度上增大带宽可调范围。

表 1 不同宽带滤波器方案的性能比较

Table 1 Performance comparison of different broadband filter schemes

Scheme	Length /μm	Maximum bandwidth /nm	Insertion loss /dB	Sidelobe suppression ratio /dB
Ref. [15]	~422	32.60	0.26	19.0
Ref. [16]	~4700	88.10	1.77	9.7
Ref. [20]	~800	16.00	0.60	
Proposed	~400	64.07	0.60	10.5

表 2 不同可调滤波器方案的性能比较

Table 2 Performance comparison of different tunable filter schemes

Scheme	Length /μm	Width /μm	Maximum bandwidth /nm	Insertion loss /dB	Sidelobe suppression ratio /dB	Bandwidth tunability /nm
Ref. [8]	~30	40	6.30	1.41	92.35	2.70-6.30
Ref. [11]			1.44	0.60	15.00	0.16-1.44
Ref. [13]	~800		13.00	2.00	30.00	1.00-13.00
Ref. [14]	~730		11.70	2.60	31.00	1.10-11.70
Proposed	~400	48	48.92	1.00	6.80	44.30-48.92

## 5 结 论

在集成光学回路中可调宽带滤波器能够有效满足日益增长的带宽需求和更高的频谱效率,是提升通信网络中信息处理速度和信息传输容量的关键设备之一。提出了一种基于 SWG-CDC 结构的滤波器。通过优化 SWG 的结构和叠加啁啾,单个反向耦合器最终实现了带宽为 64.07 nm,旁瓣抑制比大于 10.5 dB,插入损耗约为 0.60 dB 的超宽带滤波器。通过交叉波导级联两个超宽带滤波器,实现了损耗为 1 dB,带宽为 46.57 nm,带宽调节范围为 44.30~48.92 nm 的可调宽带滤波器。该滤波器具有尺寸小、矩形度高、损耗低、超宽带、多端口输出和能实现无中断传输等优势,能被广泛应用于光滤波和信息传输等领域中,以有效提升信息传输容量。

## 参 考 文 献

- [1] Zhu L, Sun J Q, Zhou Y. Silicon-based wavelength division multiplexer using asymmetric grating-assisted couplers[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 23234-23249.
- [2] Tian Y, Qiu J F, Liu C, et al. Compact polarization beam splitter with a high extinction ratio over S + C + L band[J]. Optics Express, 2019, 27(2): 999-1009.
- [3] Xu L H, Wang Y, Mao D, et al. Ultra-broadband and compact two-mode multiplexer based on subwavelength-grating-slot-assisted adiabatic coupler for the silicon-on-insulator platform[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(23): 5790-5800.
- [4] Song W G, Li H M, Gao S L, et al. Subwavelength self-imaging in cascaded waveguide arrays[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(3): 036001.
- [5] 张成龙, 蔡宸, 刘克, 等. 基于集成光波导沟槽耦合器

- 的超紧凑折射率传感器[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2413001.
- Zhang C L, Cai C, Liu K, et al. Ultracompact refractive index sensor based on integrated optical waveguide trench coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24):2413001.
- [6] 陈毅腾, 邱吉芳, 董振理, 等. 基于逆设计的新型垂直耦合器[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1713001.
- Chen Y T, Qiu J F, Dong Z L, et al. Inverse design and demonstration of vertical couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(17): 1713001.
- [7] Rahim A, Hermans A, Wohlfeil B, et al. Taking silicon photonics modulators to a higher performance level: state-of-the-art and a review of new technologies[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(2): 024003.
- [8] Li S Q, Chen W W, Wang P J, et al. Bandwidth-tunable optical passband filter based on graphene-silicon waveguide[J]. *Optics Communications*, 2018, 426: 206-211.
- [9] Dai T G, Wang G C, Guo X Q, et al. Scalable bandwidth-tunable micro-ring filter based on multi-channel-spectrum combination[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(11): 1044-1047.
- [10] Qiu H Q, Zhou F, Qie J R, et al. A continuously tunable sub-gigahertz microwave photonic bandpass filter based on an ultra-high-Q silicon microring resonator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4312-4318.
- [11] Orlandi P, Ferrari C, Strain M J, et al. Reconfigurable silicon filter with continuous bandwidth tunability[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3669-3671.
- [12] Yang H M, Li J, Zheng P F, et al. A stopband and passband switchable microwave photonic filter based on integrated dual ring coupled Mach-Zehnder interferometer [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 5502608.
- [13] Jiang J F, Qiu H Y, Wang G C, et al. Broadband tunable filter based on the loop of multimode Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 559-566.
- [14] Boroojerdi M T, Ménard M, Kirk A G. Wavelength tunable integrated add-drop filter with 10.6 nm bandwidth adjustability[J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 22043-22050.
- [15] Yun H, Hammood M, Lin S, et al. Broadband flat-top SOI add-drop filters using apodized sub-wavelength grating contradirectional couplers[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(20): 4929-4932.
- [16] Hammood M, Mistry A, Yun H, et al. Broadband, silicon photonics, optical add-drop filters with 3 dB bandwidths up to 11 THz[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(14): 2738-2741.
- [17] Sun L, Zhang Y, He Y, et al. Subwavelength structured silicon waveguides and photonic devices[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(6): 1321-1340.
- [18] Naghdi B, Chen L R. Silicon photonic contradirectional couplers using subwavelength grating waveguides[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 23429-23438.
- [19] Johnson M, Thompson M G, Sahin D. Low-loss, low-crosstalk waveguide crossing for scalable integrated silicon photonics applications[J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 12498-12507.
- [20] Qiu H Y, Jiang J F, Hu T, et al. Silicon add-drop filter based on multimode Bragg sidewall gratings and adiabatic couplers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(9): 1705-1709.