光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250209001

# 基于光栅辅助反向耦合器的箱式响应粗波分复用器

钟国舜[1,3]，李虹宇[2]，胡国华[2]，彭　松[3*]

（1. 中国电子科技集团公司第十一研究所，北京 100015；2. 东南大学 电子科学与工程学院，南京 210096；
3. 重庆光电技术研究所，重庆 400060）

**摘　要：** 提出并研制了一种基于光栅辅助反向耦合器的粗波分复用器芯片。该器件由三个具有不同反射波长的光栅级联而成。引入光栅辅助反向耦合器结构，不仅省去了使用分立的环形器，同时有效规避了传统片上分束器带来6 dB的附加损耗问题，还能有效抑制反射光对信号光的串扰。基于绝缘体上硅平台，通过优化光栅宽度、周期数量等关键参数，并结合切趾化设计方法，成功研制出三通道的粗波分复用器芯片。实验结果表明，器件的片上插损约为2.5 dB，信道串扰低于－24 dB，光谱呈现典型箱式响应，芯片面积仅为0.6 mm×1.5 mm。该研究成功突破了基于常用结构粗波分复用器件尺寸大、带宽小和难以获得箱式光谱响应的技术瓶颈。所研制的芯片在城域接入网、光纤到户、数据中心互联及硅基光子集成系统等领域具有重要应用价值。

**关键词：** 粗波分复用器；布拉格光栅；光栅辅助反向耦合器；绝缘体上的硅；箱式光谱响应

**中图分类号：** TN256　**文章编号：** 1001－5868(2025)02－0269－06

## Grating-Assisted Contra-Directional Coupler-Based Coarse-Wavelength-Division Multiplexer with Box-Like Spectral Responsivity

ZHONG Guoshun[1,3], LI Hongyu[2], HU Guohua[2], PENG Song[3]

(1. The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, CHN; 2. School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, CHN; 3. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

**Abstract:** A coarse-wavelength-division multiplexer (CWDM) chip, based on grating-assisted contra-directional couplers, was designed, fabricated, and experimentally characterized. The device integrates three gratings, with distinct reflection wavelengths, in a cascaded configuration. The grating-assisted contra-directional coupler structure eliminates the need for discrete circulators as well as effectively mitigates the additional 6-dB loss typically associated with traditional on-chip beam splitters. Furthermore, this design remarkably suppresses crosstalk between the reflected light and output signal. Leveraging a silicon-on-insulator platform, key parameters such as grating width and the number of periods were optimized, and an apodization design methodology was adopted for performance enhancement. Consequently, a compact three-channel CWDM chip was successfully fabricated. Experimental measurements indicate that the on-chip insertion loss and channel crosstalk are approximately 2.5 dB and below －24 dB, respectively, and the spectral response is characterized by a box-like shape. The chip occupies an area of merely 0.6 mm × 1.5 mm. This study addresses the critical technical challenges related to large device dimensions, narrow bandwidths, and the realization of box-like spectral responses in conventional CWDM devices. The developed chip is promising for metropolitan access networks, fiber-to-the-home systems, data center

收稿日期：2025－02－09.

*通信作者：彭　松

interconnections, and silicon-based photonic integrated circuits.

**Key words**: coarse-wavelength-division multiplexer; Bragg gratings; grating-assisted contra-directional coupler; silicon-on-insulator; box-like spectral response

## 0 引言

在光通信领域,波分复用(Wavelength Division Multiplexing,WDM)技术是提升通信容量和速率的重要技术之一,对光通信和光互连系统至关重要。根据信道间距大小,波分复用技术可分为粗波分复用(Coarse Wavelength Division Multiplexing,CWDM)技术和密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing,DWDM)技术。由于CWDM[1]具有更宽的信道带宽和信道间距,有望被用来实现低损耗、低信道串扰和大带宽响应。近年来,研究人员提出并实现了多种高集成度的波分复用器,包括基于阵列波导光栅[2-3]、多模干涉仪[4-5]、环形谐振腔[6-7]、Mach-Zehnder干涉仪[8-9]和布拉格光栅[10-11]等结构实现的波分复用器。其中,基于阵列波导光栅的复用器能够实现低信道串扰,但其插损较大且器件占用面积较大;基于多模干涉仪的波分复用器能够实现大带宽,但其反射谱通常并非箱式响应;环形谐振腔的传输光谱为洛伦兹型,带宽窄,同样难以实现箱式响应。同时,受限于自身FSR较小影响,环形谐振腔结构多被用于实现DWDM;基于Mach-Zehnder干涉仪的波分复用器性能与功率分配器密切相关,器件尺寸大也是其主要的劣势之一。相较而言,基于布拉格光栅的波分复用器是一种有力的备选方案。采用布拉格光栅结构容易获得高反射率和箱式反射谱,故这种结构有望被用来实现低损耗、低信道串扰、箱式响应,并占据更小的空间[12]。然而,光子集成领域缺乏可单片集成的非互易性器件。常见的波导光栅器件往往需要采用分立的光环形器,或片上分光器对反射光进行重新路由和输出。即使不考虑芯片本身的传输损耗,也势必会引入6 dB额外插损。同时,也无法避免会在器件输入端引入高功率的光反射,进而影响系统中激光器、光放大器的正常工作。

本文提出利用基于绝缘体上的硅(Silicon on Insulator,SOI)平台来设计高集成度的粗波分复用器。SOI材料因其芯层与包层之间显著的折射率差异,能够实现更为紧凑的器件结构。针对常见波导光栅难以单片集成非互易性器件和插损大的难题,设计出基于光栅辅助型反向耦合器(Grating-assisted Contra-directional Couplers,GA-CDC)的滤波结构。这样既可以通过光栅结构来实现器件所需的箱式响应谱,又能有效避免常见片上光栅所需的分光器,即避免了6 dB的额外插损。同时也不需要在片外采用环形器或隔离器。在此基础上,还将通过级联具有不同反射波长的光栅辅助反向耦合器,实现三通道粗波分复用器。理论模拟与实验验证表明:该器件在保持紧凑芯片尺寸的前提下,可实现低于3 dB的插入损耗和优于−24 dB的信道隔离度。所提出的制备工艺完全兼容CMOS制程技术,为低成本晶圆级量产及与电子芯片的异质集成奠定了技术基础。

## 1 光栅辅助反向耦合器的单元结构设计

本研究提出一种基于单侧壁刻写的光栅辅助反向耦合器结构,如图1所示。其由两个宽度不同的波导组成,输入波导WG1宽度为$W_1$,输出波导WG2宽度为$W_2$。两波导之间的间隙宽度为$gap$。当光信号进入输入端口时,由于两波导的宽度不同,其传播常数也有所差异,相位并不匹配。在这种情况下,两波导间的耦合会受到抑制。若无光栅辅助,两波导将无法进行耦合。而在输出波导的内侧壁引入了布拉格光栅后,光栅微扰会使得两波导的传播常数重新实现匹配。在输出波导内壁引入均匀的布拉格光栅,即光栅宽度$w_g$和光栅周期$\Lambda$在整个耦合器中保持恒定,占空比为50%。光栅数目$N$决定了光栅长度$L=N\times\Lambda$。采用GA-CDC结构

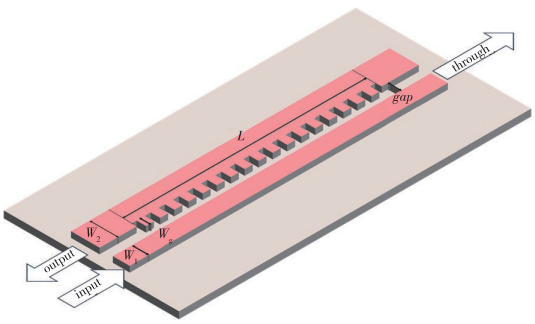



图1 光栅辅助反向耦合器结构示意图

目的是利用光栅间存在的微扰，使原本由于相位失配而不能产生耦合的正、反两方向波导模式，重新满足相位匹配条件。利用该结构能实现正反两个波导模式之间耦合，避免了在光栅输入端引入光功率分配器，直接反向耦合输出的信号将不存在 6 dB 附加损耗。

在特定波长 $\lambda_c$ 下，WG1 中的前向传播横模和 WG2 中的后向传播横模之间会发生反向耦合[13]。光信号可从 WG1 发出，并通过布拉格光栅结构耦合到 WG2 中。反向耦合遵循的相位匹配条件为[14]：

$$\lambda_c = n_1\Lambda + n_2\Lambda \tag{1}$$

式中，$n_1$ 和 $n_2$ 表示相互耦合的两波导 WG1 和 WG2 的有效折射率。当波导宽度恒定时，有效折射率保持不变，此时相位匹配条件仅随光栅周期的变化而变化。

所设计的布拉格光栅结构如图 2 所示，光栅辅助型反向耦合器的带宽公式可表示为[12]：

$$\Delta\lambda = \frac{2\lambda_c^2}{\pi(n_1+n_2)}\sqrt{\kappa^2+(\pi/L)^2} \tag{2}$$

式中，$\kappa$ 是耦合系数，$L$ 为反向耦合长度。可以看出，带宽 $\Delta\lambda$ 与两波导的有效折射率之和成反比关系，且与耦合系数以及耦合长度直接相关。事实上，耦合系数的大小，可以通过改变布拉格光栅宽度 $w_g$ 和两波导的折射率差来进行调整。光栅宽度越小，折射率差越小，则耦合系数越小。而反向耦合长度 $L$ 会随着光栅周期数 $N$ 的增加而变长。因此，改变光栅宽度、光栅周期数等参数，都会让光栅辅助型反向耦合器的谱型发生显著变化。

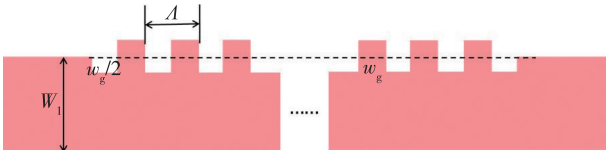
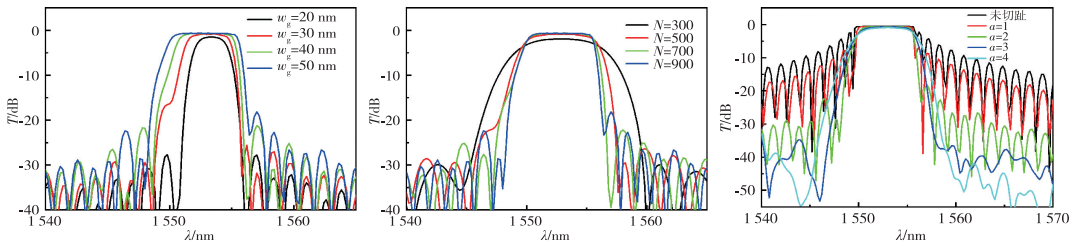



图 2　单侧壁布拉格光栅顶视图

利用 Ansys Lumerical 公司开发的 MODE Solutions 软件仿真 GA-CDC 单元结构，并探究不同因素对反射光谱的影响，仿真结果如图 3 所示。




（a）光栅宽度对透射光谱的影响　（b）光栅周期数对透射光谱的影响　（c）光栅切趾调谐系数对透射光谱的影响

图 3　光栅参数对反向耦合器结构传输光谱的影响

图 3(a)为不同光栅宽度下光谱响应情况。随着光栅宽度的增加，中心波长轻微向左漂移，平顶效果逐渐明显，透射光谱的带宽也呈现出增大的趋势，其变化趋势与公式(2)一致。这是因为光栅宽度的大小能够影响两波导之间模场重叠积分的大小。增大光栅宽度，也就增加了耦合系数，反射带宽也会随之增加；而当光栅宽度减小时，随着耦合系数变小，耦合效率逐渐降低，将很难再出现反向耦合的效果。根据仿真结果，所设计的结构中选择光栅宽度为 50 nm。从图 3(b)可以看出，随着光栅周期数的增加，插入损耗逐渐减小，反向耦合带宽也随之减小。当 $N\geqslant 700$ 时，再增大周期数 $N$ 并不会对插损和带宽造成明显的改变。

图 3(c)显示了不同切趾条件下的光谱特性。在一般波导布拉格光栅中，由于光栅折射率调制在起始位置存在突变，反射光谱中常常会出现较大的旁瓣。旁瓣的存在会使不同波长通道之间串扰增大，对相邻通道的光波信号造成严重影响。为得到不同波长信号的良好复用/解复用效果，抑制反射谱的旁瓣是必要的。光栅的切趾技术，可通过改变介质折射率的调制强度分布使耦合系数呈一定的函数形式变化，实现光栅两端与直波导的均匀过渡[15]。常用的切趾函数可以选取 Guass 函数、Hamming 函数、升余弦函数和 Tanh 函数等。本研究选择使用 Guass 函数进行光栅幅度切趾[16]，即令光栅齿宽呈高斯函数形式变化。通过调节有效折射率来改变耦合系数的大小，能够实现耦合系数在光栅结构两端的平滑过渡。实验所选用的对光栅齿宽度 $w_g$ 施加的切趾调制函数如下：

$$f(x)=\exp\left\{-\frac{2\left[a(x-0.5L)\right]^2}{L^2}\right\} \quad (3)$$

式中，$a$为调制系数。在保持其他结构参数不变的情况下，比较未切趾的光栅辅助型反向耦合器和使用高斯切趾时的透射光谱，如图3(c)所示。可看出未切趾时光谱旁瓣相当大，而对光栅宽度采用高斯函数切趾后，透射光谱逐渐变得平滑。随着切趾调制系数$a$的增大，光谱的旁瓣越小，旁瓣抑制比越好。但中心波长的反射率将跟着逐渐减小，箱型效果开始变差。这是因为反射谱包络会被切趾函数调制，具有切趾函数的形状。而高斯切趾的引入本身会使长波长和短波长处的光栅齿宽度减小，耦合效率降低。为了达到两者的平衡，在结构设计中，选用切趾系数$a$=3的高斯函数对光栅齿宽度进行切趾。

## 2 级联型三通道CWDM器件的设计与仿真

图4是利用上述GA-CDC单元构造的三通道CWDM器件结构示意图。WG0为输入波导(总线波导)其宽度为$W_0$。将宽度分别为$W_1$，$W_2$和$W_3$的三个具有单侧壁布拉格光栅波导级联起来，与输入波导构成级联型三通道CWDM。相邻两GA-CDC单元结构间的距离记为$L_s$。

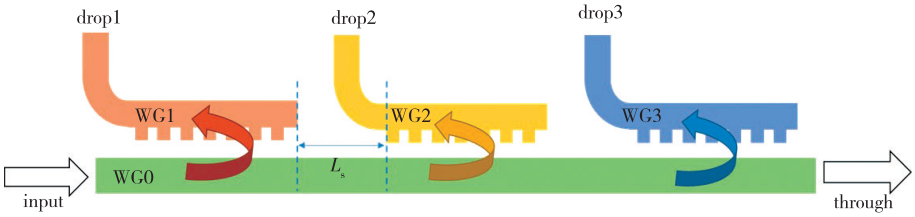



图4 三通道级联GA-CDC型粗波分复用器结构示意图

从输入端直波导WG0输入光波信号，光信号在经过每一级GA-CDC时，会将满足布拉格条件的光反向耦合到波导WG1，WG2和WG3中，再从对应drop端口输出。剩余的光信号继续沿着总线波导传向下一级光栅辅助型反向耦合器中。不同中心波长的光信号在满足相位匹配条件的GA-CDC中发生反向耦合，进而从不同的drop端口输出，实现波分解复用的效果。为了验证波分复用效果，利用三通道级联GA-CDC，设计了三通道的CWDM。

为了保证输出光谱的一致性，三个GA-CDC单元结构设计中，除了布拉格光栅周期$\Lambda$外的一切参数均保持一致。其中，波导宽度$W_1=W_2=W_3=570$ nm，耦合波导与输入波导间的间距$gap_1=gap_2=gap_3=140$ nm，光栅齿宽度$w_{g1}=w_{g2}=w_{g3}=50$ nm，光栅切趾系数$a_1=a_2=a_3=3$，光栅周期数$N_1=N_2=N_3=700$。同时，设计中心波导宽度$W_0=450$ nm，$L_s=150$ μm。综合以上对粗波分复用器结构参数的分析，最终确定的三通道级联GA-CDC型粗波分复用器的参数如表1所示。

此时，只需选择合适的光栅周期即可改变GA-CDC的反向耦合波长。根据ITU-T发布的建议G.694.2，选择粗波分复用的通道间隔为20 nm。此时三个中心波长分别被设计为1 553，1 573和1 593 nm。

**表1 三通道级联GA-CDC型粗波分复用器参数**

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|---|---|---|---|
| $\Delta\lambda$/nm | 20 | $w_{g3}$/nm | 50 |
| $\lambda_1$/nm | 1 553 | $D$/% | 50 |
| $\lambda_2$/nm | 1 573 | $\Lambda_1$/nm | 316 |
| $\lambda_3$/nm | 1 593 | $\Lambda_2$/nm | 323 |
| $h$/nm | 220 | $\Lambda_3$/nm | 330 |
| $L_s$/μm | 150 | $N_1$ | 700 |
| $W_0$/nm | 450 | $N_2$ | 700 |
| $W_1$/nm | 570 | $N_3$ | 700 |
| $W_2$/nm | 570 | $L_1$/μm | 221.2 |
| $W_3$/nm | 570 | $L_2$/μm | 226.1 |
| $gap_1$/nm | 150 | $L_3$/μm | 231 |
| $gap_2$/nm | 150 | $a_1$ | 3 |
| $gap_3$/nm | 150 | $a_2$ | 3 |
| $w_{g1}$/nm | 50 | $a_3$ | 3 |
| $w_{g2}$/nm | 50 | | |

使用Ansys Lumerical公司开发的FDTD Solutions光学软件对基于GA-CDC的三通道粗波分复用器进行3D仿真，得到的光谱如图5所示。

由图5可知，模拟得到三通道中心波长分别为1 552.9，1 573.4和1 593.3 nm。器件片上插损小于等于0.47 dB，3 dB带宽大于等于4.4 nm，信道串扰小于等于−29 dB，符合粗波分复用器设计标准。由模拟输出光谱响应可以看出，该粗波分复用器能

够实现宽信道间距的波分复用，且输出光谱具有显著箱式响应，通道串扰和插损等性能都比较理想。

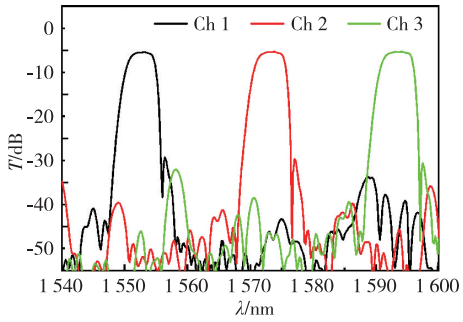



图5　三通道级联GA-CDC型粗波分复用器的模拟输出光谱响应

## 3　实验结果和讨论

根据仿真确定参数绘制掩膜版，选择在ANT加工平台上制备。在显微镜下芯片如图6所示，其面积约为0.6 mm×1.5 mm。芯片在SOI基片进行加工，该基片由220 nm厚硅波导层和2 μm厚掩埋氧化层组成。加工工艺包括：利用100 keV电子束光刻技术对具有导光能力的硅波导层进行图案化处理，接着采用各向异性电感耦合等离子体反应刻蚀（ICP-RIE）工艺进行刻蚀，刻蚀深度为220 nm，最后使用等离子体增强化学气相沉积（PECVD）工艺在器件上沉积覆盖氧化层，沉积厚度为2.2 μm。

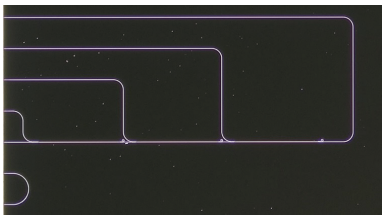


图6　三通道级联GA-CDC型粗波分复用器和参考U波导的显微镜图

将芯片固定于六维对准平台上进行通光测试。通过调节可移动对准支架，使用端面耦合对准方式将光纤阵列与芯片端面进行对准。测试采用的光源为可调谐激光器（型号为TSL-710），输出激光功率为1 mW，工作波长范围为1 480～1 620 nm。使光信号经输入光纤阵列耦合至SOI芯片的输入直波导WG0中，经过各光栅辅助型反向耦合器结构，将反向耦合中心波长为$\lambda_1$，$\lambda_2$和$\lambda_3$的光信号分别从drop1，drop2和drop3这三个下载端口输出。输出端同样与光纤阵列进行端面耦合，并通过偏振控制器（Polarization Controller，PC），将输出信号送入多端口光功率计（型号为MPM-210）中。最后剩余的光信号通过through端口输出。

在粗波分复用器的芯片的左下端，制作了参考U型波导。通过测量U形波导的插损，可估算出该芯片的端面耦合损耗约为4.5 dB/face。将三个GA-CDC的输出通道测试数据与参考U型波导进行归一化处理，得到基于GA-CDC的三通道级联型粗波分复用器的测试光谱，如图7所示。

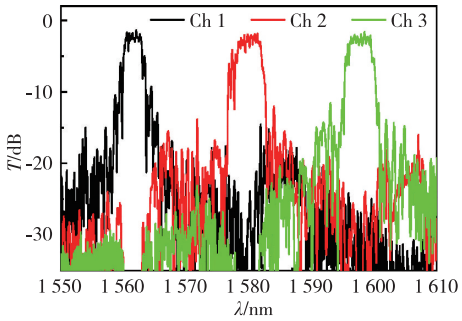



图7　三通道级联GA-CDC型粗波分复用器的实验测试光谱响应

从图7的测试光谱响应结果可知，CWDM芯片的三个通道中心波长分别为1 557.5，1 577.4和1 596.8 nm。芯片的片上插损小于等于2.67 dB，3 dB带宽大于等于3.2 nm，信道串扰小于等于－24 dB，通道间距与所设计的20 nm一致，实验结果与仿真结果相吻合。实验结果表明，所研制的芯片工作性能良好，且具有较好的箱式响应效果，成功实现了基于光栅辅助反向耦合结构的粗波分复用。三个通道的中心波长相对于仿真设计的目标波长均红移了4 nm左右，经分析认为是工艺上光栅齿的制作误差所导致的。后续可以通过进一步优化设计或者添加微加热电极来进行中心波长的调控。

## 4　结论

本文基于SOI平台提出、设计并制作了一种基于光栅辅助反向耦合器的三通道粗波分复用器。该粗波分复用器由三个光栅辅助反向耦合器级联组成。每个耦合器均包含两种不同宽度的条形波导，当光信号入射到其中一根输入波导中，由于两波导的宽度不同，其传播常数也有差异，相位失配会导致两波导间的耦合受到抑制。若无光栅辅助，两波导间将无法进行耦合。通过在输出波导的内侧壁引入了布拉格光栅后，光栅的微扰会使得两波导的传播常数重新实现匹配。在特定波长下，会增

强两波导间的反向耦合,即该信号会从输出波导中输出,成功实现了反射信号的分离。由于本文在CWDM中引入了反向耦合器结构,器件不但能获得光栅所特有的箱式光谱特性,还能有效避免使用分立的环形器或片上分束器,成功减小6 dB的附加损耗。实验测得芯片的信道间隔约为20 nm,片上插损约为2.5 dB,信道串扰优于－24 dB,且通道一致性和光谱的箱式响应效果良好,成功实现了粗波分复用器。今后,还将引入基于光栅辅助反向耦合器的啁啾波导光栅[17],并在每个GA-CDC单元中通过引入级联的啁啾波导光栅设计来获得更大的带宽、更高的边模抑制比以及更低串扰的波分复用器。这种基于GA-CDC级联的CWDM不但可用于低成本和高能效的光互连,还可以与DWDM芯片实现单片集成。成功突破常规波分复用器波长范围受到自由光谱范围的限制,进一步拓宽DWDM的通道数和波长覆盖范围,大幅度提高光通信容量。

## 参考文献:


[1] Liu Y, Huang X, Guan H, et al. C-band four-channel CWDM (de-) multiplexers on a thin film lithium niobate-silicon rich nitride hybrid platform [J]. Optics Letters, 2021, 46(19): 4726-4729.

[2] Pan P, An J, Wang Y, et al. Compact 4-channel AWGs for CWDM and LAN WDM in data center monolithic applications [J]. Optics & Laser Technology, 2015, 75: 177-181.

[3] Kim W C, Kim Y S, Kim S Y, et al. Investigation of 18-channel CWDM arrayed waveguide grating with silica-based waveguide[J]. Optical Engineering, 2016, 55(8): 087110.

[4] Hu Y, Jenkins R M, Gardes F Y, et al. Wavelength division (de)multiplexing based on dispersive self-imaging[J]. Optics Letters, 2011, 36(23): 4488-4490.

[5] Chen G, Ruan Z, Wang Z, et al. Four-channel CWDM device on a thin-film lithium niobate platform using an angled multimode interferometer structure [J]. Photonics Research, 2022, 10(1): 8-13.

[6] Chen P, Chen S, Guan X, et al. High-order microring resonators with bent couplers for a box-like filter response[J]. Optics Letters, 2014, 39(21): 6304-6307.

[7] Manganelli C L, Pintus P, Gambini F, et al. Large-FSR thermally tunable double-ring filters for WDM applications in silicon photonics[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 6600310.

[8] Horst F, Green W M J, Assefa S, et al. Cascaded Mach-Zehnder wavelength filters in silicon photonics for low loss and flat pass-band WDM (de-) multiplexing[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 11652-11658.

[9] Xu H, Shi Y. Flat-top CWDM (de)multiplexer based on MZI with bent directional couplers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(2): 169-172.

[10] Tan D H, Ikeda K, Zamek S, et al. Wide bandwidth, low loss 1 by 4 wavelength division multiplexer on silicon for optical interconnects [J]. Optics Express, 2011, 19(3): 2401-2409.

[11] Shi W, Yun H, Lin C, et al. Ultra-compact, flat-top demultiplexer using anti-reflection contra-directional couplers for CWDM networks on silicon[J]. Optics Express, 2013, 21(6): 6733-6738.

[12] Liu D, Zhang L, Jiang H, et al. First demonstration of an on-chip quadplexer for passive optical network systems [J]. Photonics Research, 2021, 9(5): 757.

[13] Shi W, Wang X, Lin C, et al. Silicon photonic grating-assisted, contra-directional couplers [J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3633-3650.

[14] Shi W, Veerasubramanian V, Patel D, et al. Tunable nanophotonic delay lines using linearly chirped contradirectional couplers with uniform Bragg gratings [J]. Optics Letters, 2014, 39(3): 701-703.

[15] Jiang J, Qiu H, Wang G, et al. Silicon lateral-apodized add-drop filter for on-chip optical interconnection [J]. Applied Optics, 2017, 56(30): 8425-8429.

[16] Ma M, Chen Z, Yun H, et al. Apodized spiral Bragg grating waveguides in silicon-on-insulator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(1): 111-114.

[17] Wang D, Sun Y, Zhu W, et al. Grating-assisted on-chip optical dispersive delay lines with suppressed ripples based on disorder-induced self-compensation effect [J]. ACS Photonics, 2024, 11(11): 4648-4661.


## 作者简介:


**钟国舜**(1983—),男,湖南省常德市人,高级工程师,主要研究方向为激光技术、微波光子器件及集成技术;

**彭 松**(1982—),男,重庆市人,硕士,高级工程师,主要从事半导体光电子技术的研究。