

引用格式: HAN Xilin, ZHANG Lingxuan, XUE Jintao, et al. Hybrid Wavelength- and Mode-division Multiplexing System Based on Microring Resonators with Mode Splitters[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(11):1113002

韩溪林, 章玲璇, 薛锦涛, 等. 基于带有模式分离器的微环谐振器的波长-模式混合复用系统[J]. 光子学报, 2022, 51(11): 1113002

基于带有模式分离器的微环谐振器的波长-模式混合复用系统

韩溪林^{1,2}, 章玲璇^{1,2}, 薛锦涛^{1,2}, 鲍慎雷^{1,2}, 吴锦仪^{1,2}, 米磊¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:在微环谐振器耦合区添加模式分离器,提出一种硅光混合集成的波长复用和模式复用的结构,以解决微环谐振器无法进行模式分离的问题。该微环谐振器的品质因子为 3 692, 3 dB 光学带宽为 52 GHz, 自由光谱范围为 1.03 THz, TE₀ 模式产生的串扰为 -11.0 dB, 插入损耗低至 -0.66 dB。基于此,提出一个双模式输入的发射-接收的模式复用系统。仿真结果显示该系统可以有效分离 TE₀ 和 TE₁ 模式,且微环具有波长选择能力。系统复用器和解复用器在 C 波段可以实现超紧凑的波长/模式复用结构。此外,制造公差从 -10 nm 到 +15 nm 内滤出端口有大于 1 dB 的响应,传输端口有小于 -20 dB 的响应。该微环结构能够同时实现模式和波长选择功能。

关键词:硅光子学;光通信;波分复用;模分复用;混合复用;微环谐振器;模式分离器

中图分类号:TN256

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225111.1113002

0 引言

光子技术具有高速率、大带宽、低功耗的特性,成为处理信息和通信的重要技术之一。硅光子技术作为最有前景的光子技术之一,其最大优势在于可以和 CMOS 技术兼容,无论在尺寸还是价格方面都极具竞争力。由于硅光子技术中出现了许多如波分复用(Wavelength-Division Multiplexing, WDM)^[1-3]和偏振分复用(Polarization-Division Multiplexing, PDM)^[4-7]等可以增加信息密度的技术,因此硅光子技术在数据承载网络、数据中心等应用领域有能力支撑高速数据传输的发展。

WDM 技术允许光携带不同波长的信息,也是最流行的多路复用技术。不同的 WDM 信道间隔通常为 50~400 GHz。类似地,PDM 技术通过使用光的两个正交偏振态使信息密度加倍。然而,WDM 和 PDM 系统的波长通道和偏振态是有限的。近年来,人们研究了模分复用(Mode-Division Multiplexing, MDM)技术^[8-10],通过多模波导中引入多个模式来进一步提高单波长载波带宽的密度。结合 MDM、PDM 和 WDM 的混合复用技术在提高带宽密度^[5-6, 11]方面具有很大的潜力。

微环谐振器(Micro-ring Resonator, MRR)^[12]自发明以来一直备受关注。MRR 由于占用空间小、固有波长复用特性和灵活的可扩展性^[13-14]而在波分复用系统中很受欢迎。一些带有 MRR 的混合 WDM-MDM 系统已经取得了一些研究成果^[2, 11, 15]。目前,WDM-MDM 混合复用技术多采用不同功能器件级联的方式^[2, 11, 15]。虽然在 WDM 系统中经常使用 MRR,但是仍很难直接通过 MRR 实现 MDM 系统功能。2021 年 YE M 等创造性地提出了一种采用直角转弯结构的多模环形谐振器^[16](Multi-Mode Ring Resonator, MMRR),从而达到波长-模式复用的效果。该 MMRR 的直角转弯处采用内全反射镜,两个耦合区在直角转

基金项目:国家自然科学基金(No. 61635013)

第一作者:韩溪林(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为微纳光子器件。Email:hanxilin@opt.cn

导师:米磊(1979—),男,副研究员,博士,主要研究方向为微纳光子器件。Email:millay@126.com

收稿日期:2022-03-22;录用日期:2022-04-15

<http://www.photon.ac.cn>

弯处,耦合时通过同样结构的波导捕捉倏逝波。该方法的优点在于MMRR可以对多个模式进行谐振,缺点在于过于复杂的制造流程与制造精度,并且需要在转角处加上内全反射镜。为了简化设计和制造过程,本文提出了一种同时具有波长和模式选择功能的圆形弯曲的微环结构,该结构仅仅在传统MRR基础上改动了耦合区波导。为了实现波长和模式选择功能,需要平衡基于MRR的WDM-MDM的串扰和插入损耗。这是因为在耦合区添加模式分离器会不可避免地增加MRR的腔损耗。为了增强分模效应,不得不采用一个较长且波导间隙很小的模式分离器,导致MRR传输响应的插入损耗较大。因此,在设计时需要权衡信道插入损耗和信道间串扰。本文对模式分离器的关键参数优化进行权衡,使其适配于在C波段谐振的MRR。结合后的MRR既有波长选择能力又具有模式分离能力。

1 微环谐振器理论

双总线微环谐振器的基本结构如图1所示,它由两个直波导和一个环形波导组成。输入光源通过直波导后耦合进环形波导。光在环形波导中会谐振,最终在上波导处滤出。在下方耦合区处,定义直波导中耦合前后电场强度分别为 A_1 和 A_2 ,对应微环中的电场为 B_1 和 B_2 。而上方耦合区处,环形波导中电场强度左侧为 A_3 ,右侧为 A_4 ,对应上方滤出的直波导中电场为 B_3 和 B_4 。定义耦合系数为 k ,透过系数为 t ,环内损耗系数为 a ,光在环内绕一周所积累的相位为 $\varphi=2\pi Ln_{\text{eff}}/\lambda$,其中 L 为微环的周长, n_{eff} 为微环材料的有效折射率, λ 为输入光波长。于是该微环谐振器可以被描述为

$$\begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 & jk_1 \\ jk_1 & t_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} A_4 \\ B_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_2 & jk_2 \\ jk_2 & t_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_3 \\ B_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, A_3 和 B_2 , A_4 和 B_1 的关系为

$$A_3 = \sqrt{a} e^{j\frac{\phi}{2}} B_2 \quad (3)$$

$$A_4 = \sqrt{a} e^{j\frac{\phi}{2}} B_1 \quad (4)$$

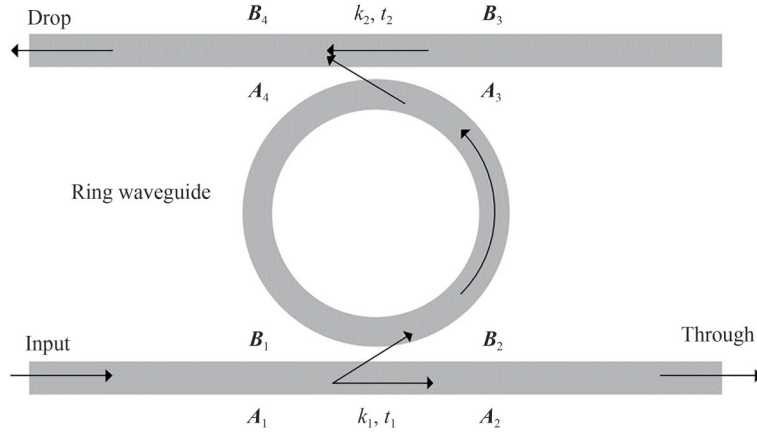


图1 双总线环形谐振器耦合原理图

Fig. 1 Schematic diagram of double-bus ring resonator

由式(1)~(4),可得 Through 端口和 Drop 端口的传输响应分别为

$$T_{\text{Through}} = \frac{|A_2|^2}{|A_1|^2} = \frac{(at_2)^2 + t_1^2 - 2at_1t_2 \cos \phi}{1 + (at_1t_2)^2 - 2at_1t_2 \cos \phi} \quad (5)$$

$$T_{\text{Drop}} = \frac{|B_4|^2}{|A_1|^2} = \frac{k_1^2 k_2^2 a}{1 + (at_1t_2)^2 - 2at_1t_2 \cos \phi} \quad (6)$$

描述MRR的参数有自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)和品质因子 Q 。FSR为谐振峰之间的距

离,表达式为

$$\text{FSR} = \frac{\lambda^2}{n_g L} \quad (7)$$

品质因子 Q 定义为在谐振时传输曲线的锋利程度,即

$$Q = \frac{\lambda_{\text{res}}}{\text{FWHM}} \quad (8)$$

式中, λ_{res} 为谐振波长, n_g 为群折射率, FWHM (Full-Width Half Maximum) 为半高全宽。

2 器件设计

设计中,需要平衡器件的插入损耗和通道间的串扰。此外,将模式分离器添加到 MRR 中。设计模式分离器的长度、间隙宽度、MRR 半径和波导宽度等参数,使得 MRR 能够和模式分离器匹配,从而完成单一器件对模式和波长的选择。该设计采用三维时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)解决方案,网格精度为 20 nm。

2.1 WDM-MDM 系统结构示意图

WDM-MDM 系统的原理图如图 2 所示。该设计基于标准的绝缘体上硅(Silicon on Insulator, SOI)平台,器件的背景材料为 SiO_2 。为了简单示意,展示了两个 WDM 通道和两个 MDM 通道,它们作为一个解复用器来演示系统的功能。信道的数量可以任意设置,同样的结构也可以作为一个发射机。在图 2 中,输入为红色和蓝色表示的两个波长,每个波长在 TE_0 和 TE_1 中包含两个模式。每个具有特定波长和模式的通道通过相应的 MRR 滤出。 TE_1 模式从前两个 MMR 解复用出来。前两个 MRR 的底部耦合区域包含模式分离器,在不改变模阶数^[17]的情况下将 TE_0 和 TE_1 模式分开。后面两个 MRR 对每个波长基模进行解复用,其耦合区域没有模式分离功能。前两个 MRR 和后两个 MRR 之间由一个锥型波导连接。在该系统中传输时,每个波长的 TE_0 和 TE_1 模式可在相应的滤出端口(Drop port)进行解复用。图 2 下半部分所示为模式分离器,该模式分离器采用非对称波导结构设计,由条形波导和狭缝波导组成。由于狭缝和条形波导中 TE_1 模式的有效折射率变化较小,而 TE_0 模式的折射率变化较大,因此合理设计波导几何结构,可以使狭缝波导中的 TE_1 模式耦合到条形波导中,而 TE_0 模式传播的扰动较小。

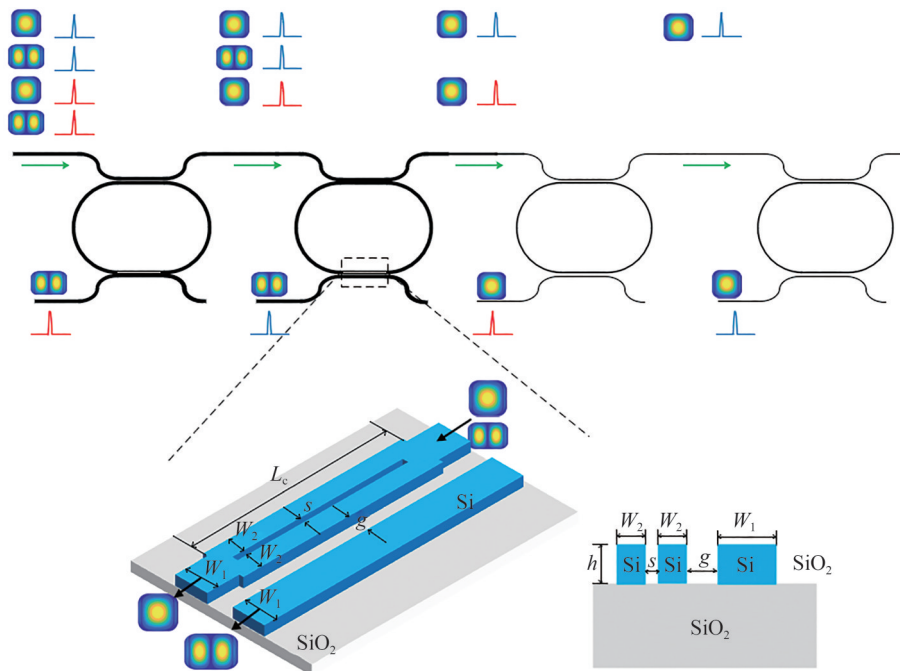


图 2 基于带模式分离器的微环谐振器的 WDM-MDM 体系结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of WDM-MDM system based on microring resonator with mode splitter

2.2 模式分离器设计

为满足 TE_1 模式的传播条件,将 W_1 的宽度定为 880 nm,高度定为 220 nm。如图 3(a)所示, TE_0 模式的电场分布在条形波导中是均匀的,且电场功率最大的地方被限制在波导内。如图 3(c)所示,波导宽度 W_2 的取值需要考虑 TE_1 模场在狭缝波导两侧的对称分布,因此 W_2 最小取值即为 TE_1 模场宽度的一半。此外,还需考虑模式分布与波导折射率的匹配,满足匹配才能实现 TE_1 模式从狭缝波导到条形波导的耦合,而 TE_0 模式不能耦合进入条形波导。 W_2 取值也不宜过大,因为过大的 W_2 会在 W_1 和 W_2 模式转换处产生很大的损耗,因此确定参数 $W_2=430$ nm。狭缝的宽度 s 需要精细设计,首先要满足 TE_1 模场的分离,其次宽度也不能过大而破坏了 TE_1 模场分布的完整性。硅光工艺极限为 20 nm,因此在功能和工艺误差权衡后最终确定狭缝宽度 $s=50$ nm。图 3(b)和(d)分别显示了条形波导和狭缝波导中 TE_1 模式的电场分布。可以看出中间狭缝对 TE_1 模式的有效折射率影响很小。因此,作为模式分离器的一部分,狭缝波导方案可以满足区分 TE_0 模式和 TE_1 模式的要求。

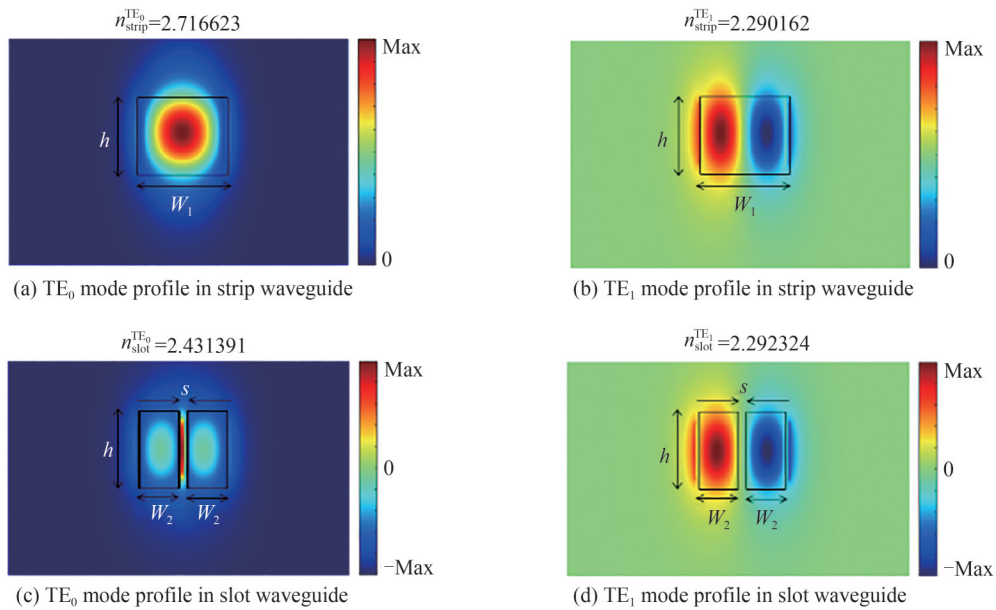


图3 TE_0 、 TE_1 模式在条形波导和狭缝波导中的模场分布

Fig. 3 Mode profile of TE_0 and TE_1 mode in strip and slot waveguide

研究了不同波导耦合间距下的模式分离器。该模式分离器用于微环谐振器的耦合区中,根据微环谐振器的理论,设计微环谐振器耦合区的耦合效率为 0.1 左右。经过 20 nm 步长的参数扫描,最终确定波导间距 g 为 200 nm。图 4(a)和(b)分别表示 TE_0 和 TE_1 模式在耦合长度 L_c 为 12.5 μm 、耦合间隙 g 为 200 nm 模式分离器结构下的电场分布,其结构示意图如图 2 所示。

如图 4(a)所示,当输入的 TE_0 模式从上波导通过模式分离器后传输时,大部分光被限制在狭缝波导中,少量功率耦合到下波导中。相反,当入射光为 TE_1 模式时,大部分光耦合到下波导,模式的阶数保持不变,如图 4(b)所示。仿真结果表明,该模式分离器在耦合长度为 12.5 μm 时工作良好。然而,有高耦合系数的耦合区也一定有较高的腔损耗,导致微环响应很低。为了平衡 MRR 中模式和波长的复用/解复用性能,将耦合区长度减小到 6 μm ,以实现较合适的耦合系数,从而平衡腔损与响应。图中给出了耦合长度为 6 μm 的模式分离器在 TE_0 和 TE_1 模式下的电场分布。 TE_0 模和 TE_1 模输入到耦合区长度为 6 μm 的模式分离器中,其电场分布分别如图 4(c)和(d)所示。图 4(e)显示了当使用图 4(c)中的模式分离器结构时, TE_0 模式输入后的两个输出端口的功率传输响应。在 1 550 nm 处,上下端口的功率传输分别为 -0.58 dB 和 -12.28 dB。同样,图 4(f)为图 4(d)所示结构的传输响应。在 1 550 nm 时,传输响应在上下输出端口分别为 -0.56 dB 和 -9.56 dB。

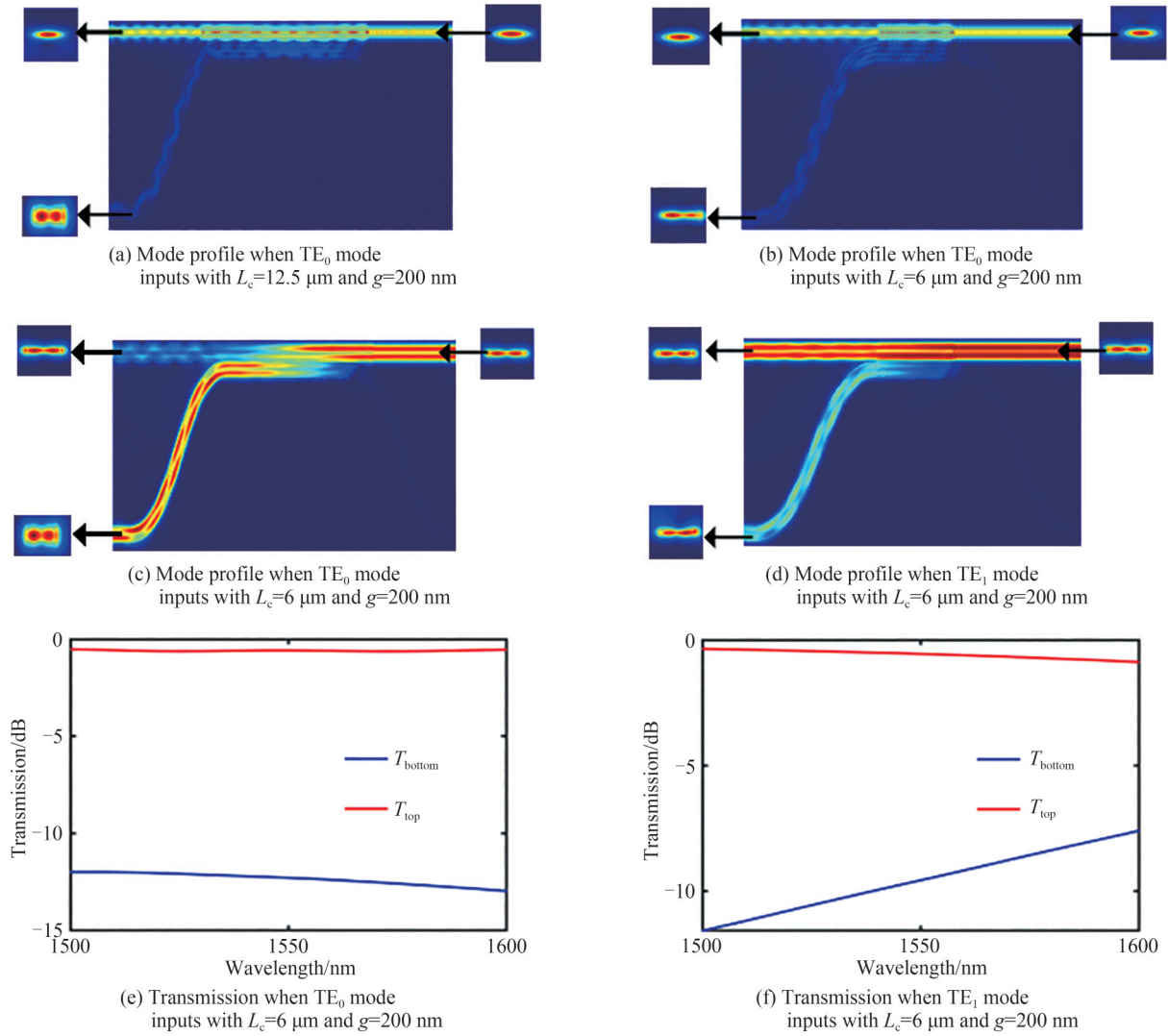


图4 模式分离器中的模场分布及不同端口的传输响应

Fig. 4 Mode profile in mode splitter and transmission response of different port

2.3 带模式分离器的MRR设计

设计中,图4(c)和(d)所示的模式分离器结构被用于MRRs的底部耦合区域,如图5所示。图5(a)和(b)分别展示了 TE_1 和 TE_0 模式输入时的MRR原理,其中虚线框为图4(c)和(d)中所示的模式分离器结构。 TE_0 模式在MRR底部模式分离器中的损耗为0.087,远高于 TE_1 模式的0.01,该损耗可以视作波导内损耗。虽然图4(c)中模式分离器下方端口仍有一12.28 dB响应,但是该模式分离器结构对于 TE_0 模式的损耗很大,根据微环谐振理论, TE_0 模式在微环中谐振后依然可以很好地被滤掉。这使得只有当输入为 TE_1 模式时才会发生谐振。图5(c)和(d)为不同模式输入MRR的电场分布,对应于图5(a)和(b)。从图5(c)可以清楚地看出,输入 TE_1 模式时,MRR发生谐振。相比之下,MRR在输入 TE_0 模式时具有较大的耦合损耗,导致腔体损耗较大,这一点在图5(d)可以很好地体现,其微腔中几乎没有谐振,因此可以忽略掉在滤出端口的光输出。 TE_1 和 TE_0 模式输入时MRR的传输响应如图5(e)和(f)所示。以上结果表明,底部耦合区采用模式分离器的MRR具有模式-波长复用功能。

如图5(c)所示的结构,微环半径为 $15 \mu\text{m}$,底部耦合区功率耦合系数为0.111,在顶部耦合区功率耦合系数为0.094,环形波导中光传播损耗系数为0.008,即光在微环中传输一周损耗为 -0.035 dB 。与底耦合区域的模式分离器设计相比,设计在顶耦合区域的模式分离器为了实现所需要的功率耦合系数,耦合长度为 $6 \mu\text{m}$,间隙为 200 nm 。因此采用本文提出的MRR设计时,当输入光波长在 1550 nm 处,如图5(e)所示,滤出端口(Drop port)的传输峰值为 -0.66 dB ,传输端口(Through port)的最小响应为 -37.19 dB 。但如图5(f)

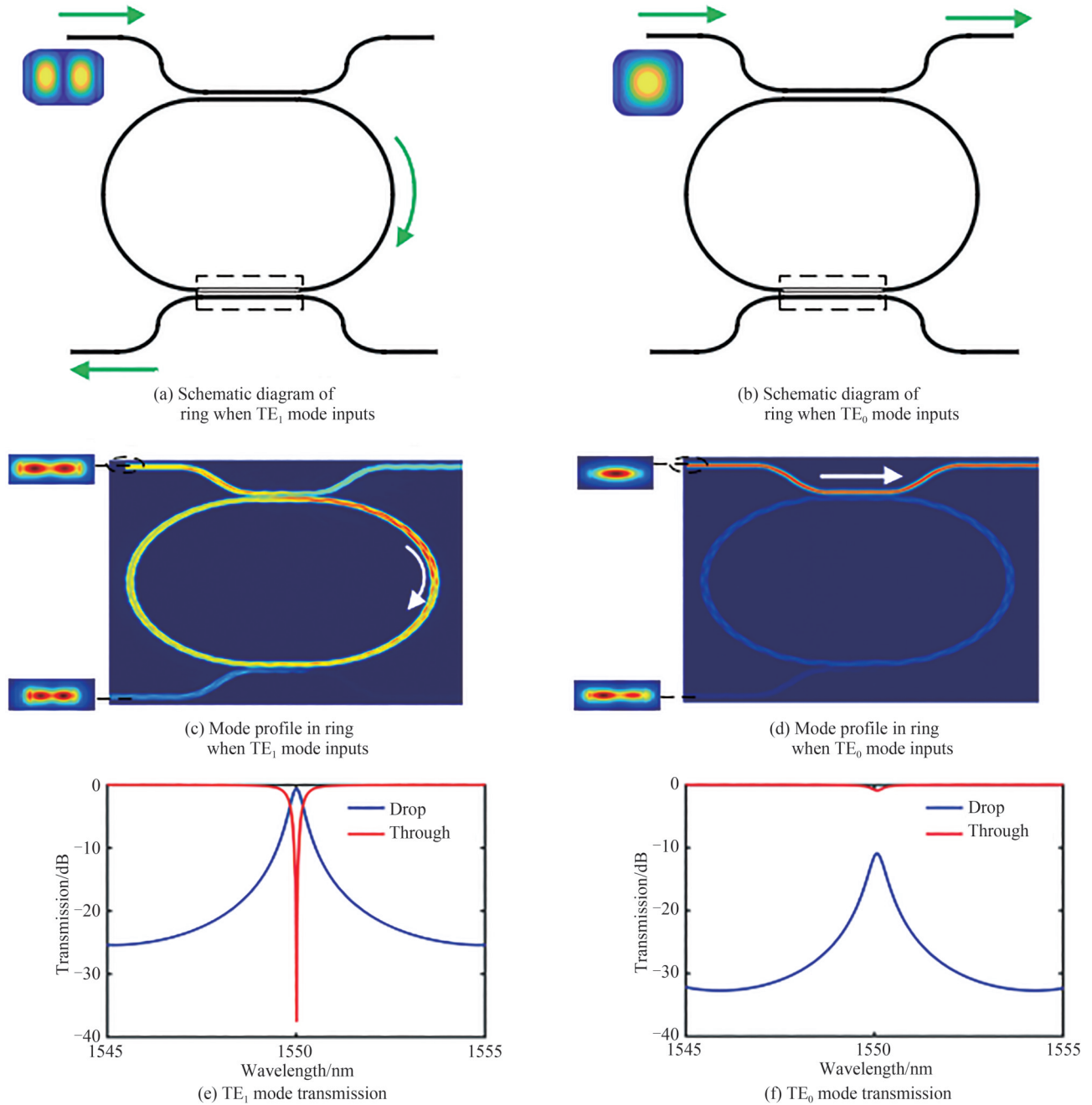


图5 微环谐振器在 TE_0 和 TE_1 模式输入下的模场分布与传输响应
 Fig. 5 Mode profile and transmission response of ring resonator when TE_0 and TE_1 mode inputs

所示,当输入变为 TE_0 模式时,谐振现象不明显,光很难传输到滤出端口。在波长为 1550 nm 处可以得到,滤出端口的传输峰值为 -11.0 dB,传输口的最小响应为 -0.9 dB。 TE_0 模式输入时 MRR 顶部耦合区域的功率耦合系数为 0.126,而 TE_0 模式输入时 MRR 底部耦合区域的功率耦合系数仅为 0.016。同样,由于模式分离器中 TE_0 模式的损耗较大,环形行程空腔损耗也随之增大至 0.085。

提出的 MRR 结构实现了 8.28 nm 的 FSR,对应频域 1.03 THz,足以支持 8 个通道的波长,通道间距大于 100 GHz。MRR 的 Q 值约为 3 692,可以实现大于 52 GHz 的 3 dB 带宽。与 YE M 等提出的 MMRR^[16] 在 TE_1 模式下的性能对比见表 1。可以看到,MRR 结构虽然不能对多个模式进行谐振,但是在 TE_1 模式下,插损、自由光谱范围和串扰都优于 MMRR。因此,提出的微环结构能够同时满足模式-波长复用需求。

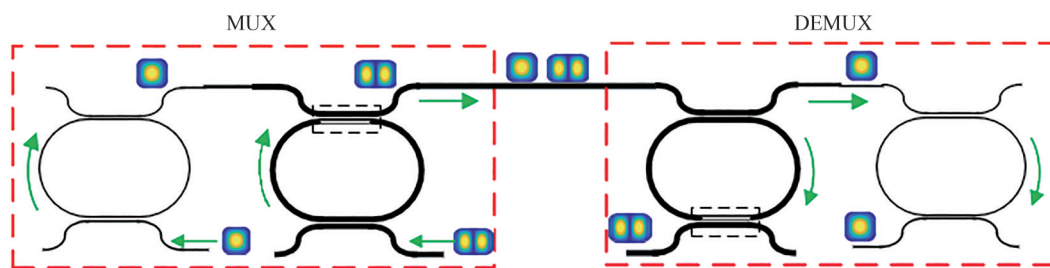
表1 不同WDM-MDM结构在TE₁模式下的性能对比
Table 1 Performance comparison of different WDM-MDM architectures in TE₁ mode

Reference	Insertion loss /dB	FSR/nm	Q	Extinction ratio/dB	Crosstalk/dB	Experimental or Theoretical
[16]	7.18	6.36	5 700	More than 20	-8	Experimental
Our work	0.66	8.28	3 692	More than 20	-11	Theoretical

3 系统验证

为了验证系统结构的可行性,建立了一个最基本的WDM-MDM系统,该系统将两个MRR作为复用器,两个MRR作为解复用器,并用一个锥形波导连接。

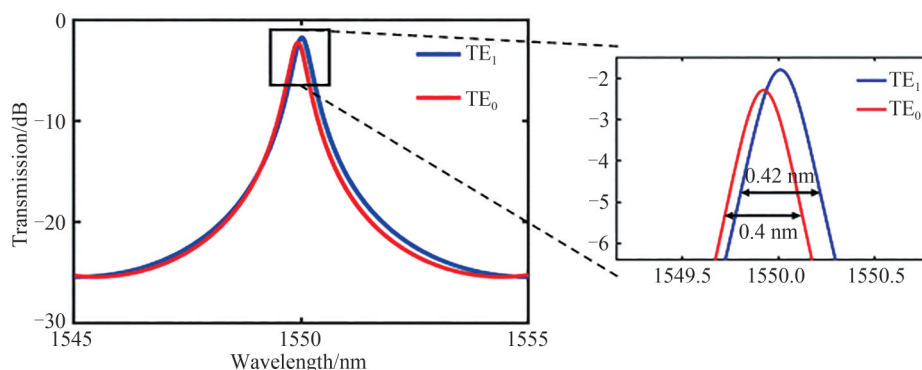
如图6(a)所示,1 550 nm的TE₀和TE₁模式从复用器(Multiplexer, MUX)的添加端口输入。两种模式在顶部总线波导上通过锥形波导结合,然后传输到解复用器(Demultiplexer, DEMUX)。在解复用器中,因为MRR的谐振条件不同,模式被滤出到相应的滤出端口。TE₀和TE₁解复用MRR之间的锥形波导作为模式转换器,长度为10 μm,两端宽度分别为0.88 μm和0.6 μm,插入损耗为0.05 dB。图6(b)为WDM-MDM验证系统的电场分布。在系统中,TE₀模式和TE₁模式的总插入损耗分别为2.3 dB和1.8 dB,如图6(c)所示。由于在解复用器上两种模式没有完全分离,TE₁模式输出端口的串扰约为-11 dB,是可接受的信道串扰。综上,所提出的MMR结构可以实现WDM-MDM的功能。



(a) Schematic diagram of WDM-MDM validation system with proposed MRRs



(b) Mode profile of WDM-MDM validation system



(c) Transmission response of WDM-MDM validation system

图6 WDM-MDM验证系统的模式分离与波长选择

Fig. 6 Mode splitter and wavelength selection of WDM-MDM validation system

4 制造容许误差

MRR的制造容许误差 ΔW 如图7所示,反映了制造容许误差和微环端口响应的关系。图2所示的结构参数变为 $W_1 = W_1 + \Delta W$, $W_2 = W_2 + \Delta W$, $g = g - \Delta W$, $s = s - \Delta W$ 。虽然 $\Delta W = \pm 1 \text{ nm}$ 、 $\pm 3 \text{ nm}$ 在现有硅光工艺水平下较难实现,但是为了防止光刻出现较小误差达到 $\pm 1 \text{ nm}$ 、 $\pm 3 \text{ nm}$,因此有讨论这几个点的必要性。当 ΔW 取 $+3 \text{ nm}$ 、 $\pm 1 \text{ nm}$ 时,传输端口响应比 $\Delta W = 0$ 时更佳,但是在传输端传输响应很小的情况下,更在意滤出端的响应。而在 $\Delta W = 0$ 时滤出端口为 -0.66 dB ,优于 $\Delta W = +3 \text{ nm}$ 时的 -0.8 dB , $\Delta W = +1 \text{ nm}$ 时的 -0.81 dB 与 $\Delta W = -1 \text{ nm}$ 时的 -0.86 dB ,因此 $\Delta W = 0$ 点是权衡后的最优点。图7中可以看到,制造公差 ΔW 在 -10 nm 到 $+15 \text{ nm}$ 范围内是可接受的,此时传输端口的传输响应小于 -1.0 dB ,滤出端口的传输响应小于 -20 dB 。

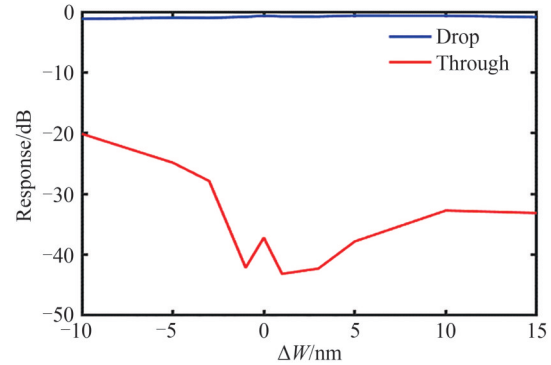


图7 不同制造误差下 TE_1 模式在 1550 nm 处的响应
Fig. 7 Response of TE_1 mode at 1550 nm with different fabrication error

5 结论

提出了一种基于带模式分离器的微环谐振器的波长-模式混合复用系统。在MRR滤出端口处的耦合区域中,使用一个狭缝波导的模式分离器作为关键部件。这种WDM和MDM的混合方式极大地提高了数据传输密度。选择合适长度的模式分离器,并将其添加到双总线MRR的耦合区域,可以得到新的MRR结构。该结构具有 TE_0 和 TE_1 模式的分模能力。这是一个能同时实现模式和波长选择的全新微环结构,由于提出的MRR设计具有多种功能,因此可以实现一个超紧凑的WDM-MDM系统。仿真结果表明,在 3 dB 带宽为 52 GHz 、 Q 因子为 3692 的情况下,MRR在滤出端口处最大传输响应为 -0.66 dB 。本文提出的MRR在 -10 nm 到 $+15 \text{ nm}$ 范围内也表现出良好的制造容许误差。所演示的双模收发器MDM系统能够有效地分离 TE_0 和 TE_1 模式,并具有波长选择能力。通过改变耦合区结构和增加微环数量,该WDM-MDM系统可以扩展更多的模式和波长通道。

参考文献

- [1] JANZ S. Silicon-based waveguide technology for wavelength division multiplexing[J]. Silicon Photonics, 2004: 323-360.
- [2] TAN Y, WU H, WANG S, et al. Silicon-based hybrid demultiplexer for wavelength-and mode-division multiplexing[J]. Optics Letters, 2018, 43(9): 1962-1965.
- [3] CUNNINGHAM D G, WHITE I H. Advances in local area optical data communication systems[J]. Reports on Progress in Physics, 2020, 83(7): 075101.
- [4] WU S, MU X, CHENG L, et al. State-of-the-art and perspectives on silicon waveguide crossings: a review [J]. Micromachines, 2020, 11(3): 326.
- [5] DAI D, BOWERS J E. Silicon-based on-chip multiplexing technologies and devices for Peta-bit optical interconnects[J]. Nanophotonics, 2014, 3(4-5): 283-311.
- [6] ZHANG Y, HE Y, ZHU Q, et al. On-chip silicon polarization and mode handling devices [J]. Frontiers of Optoelectronics, 2018, 11(1): 77-91.
- [7] YAN X, CHEN J, DAI D, et al. Polarization multiplexing silicon-photonics optical phased array for 2D wide-angle optical beam steering[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(2): 1-6.
- [8] YANG Z, YU W, PENG G, et al. Recent progress on novel DSP techniques for mode division multiplexing systems: a review[J]. Applied Sciences, 2021, 11(4): 1363.
- [9] SABITU R I, KHAN N G, MALEKMOHAMMADI A. Recent progress in optical devices for mode division multiplex transmission system[J]. Opto-Electronics Review, 2019, 27(3): 252-267.
- [10] BERDAGUE S, FACQ P. Mode division multiplexing in optical fibers[J]. Applied optics, 1982, 21(11): 1950-1955.
- [11] DAI D, ZHU Z, ZHAO W, et al. Silicon photonic devices for wavelength/mode-division-multiplexing[C]. Integrated Optics: Design, Devices, Systems and Applications VI. International Society for Optics and Photonics, 2021, 11775: 117750E.
- [12] MARCATILIE A J. Bends in optical dielectric guides[J]. Bell System Technical Journal, 1969, 48(7): 2103-2132.

- [13] LIU D, XU H, TAN Y, et al. Silicon photonic filters[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(9): 2252-2268.
- [14] ALIMONTI G, AMMENDOLA R, ANDREAZZA A, et al. Use of silicon photonics wavelength multiplexing techniques for fast parallel readout in high energy physics[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 936: 601-603.
- [15] LI C, ZHANG H, ZHOU G, et al. Hybrid WDM-MDM transmitter with an integrated Si modulator array and a micro-resonator comb source[J]. *Optics Express*, 2021, 29(24): 39847-39858.
- [16] YE M, SUN C, YU Y, et al. Silicon integrated multi-mode ring resonator[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(2): 1265-1272.
- [17] LIAO J, ZHANG L, LIU M, et al. Mode splitter without changing the mode order in SOI waveguide[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(22): 2597-2600.

Hybrid Wavelength- and Mode-division Multiplexing System Based on Microring Resonators with Mode Splitters

HAN Xilin^{1,2}, ZHANG Lingxuan^{1,2}, XUE Jintao^{1,2}, BAO Shenlei^{1,2}, WU Jinyi^{1,2}, MI Lei¹

(1 *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The applications of silicon photonics in data bearer networks, data centers and other scenarios will support high-speed data transmission. In order to meet the demand, lots of technologies in silicon photonics have emerged, such as Wavelength Division Multiplexing (WDM), Polarization Division Multiplexing (PDM) and Mode Division multiplexing (MDM). To further increase the channel capacity, the hybrid multiplexing technology is studied based on the technologies above. Our work is such a hybrid WDM-MDM multiplexer.

This paper focuses on the design of a microring resonator with mode splitter. First of all, the effect of mode splitting is better at a longer length, but we need to put the mode splitter into the microring resonator, and such a high mode separation efficiency and coupling efficiency will lead to low efficiency of microring resonance. So, we take the appropriate length. Secondly, an asymmetric structure for the geometry of the mode splitter is designed. One side of the structure is a waveguide with a width of 0.88 μm , allowing high order mode transmission, and the other side is a slot waveguide with a width of 0.86 μm , with an air gap of 50 nm in the middle. The advantage of this structure is that it can effectively split TE_0 and TE_1 modes. In addition, for microring resonators, we can select the desired resonant wavelength by designing appropriate parameters such as radius, waveguide width, coupling region length and gap.

By simulating the proposed structure with the finite difference time domain method, the multiplexer and demultiplexer can realize ultra-compact WDM-MDM structure at C band. The microring resonator has a response of -0.66 dB to TE_1 mode input, a Q value of 3 692, and an optical bandwidth of 52 GHz. Its free spectral range is 1.03 THz, and the crosstalk generated by TE_0 mode is -11.0 dB. The insertion loss of the microring resonator is as low as -0.66 dB. Based on this, we also propose a transmitter-receiver MDM system with dual mode input. The simulation results show that the dual-mode input MDM system based on microring resonator can effectively separate TE_0 and TE_1 modes, and the microring also has the ability of wavelength selection. In addition, the through ports with fabrication tolerance from -10 nm to $+15$ nm have responses of less than -20 dB, while the response of the drop ports remains within -1 dB. Compared with other devices, our design has advantages in insertion loss, crosstalk and FSR.

In conclusion, proposed system using wavelength-mode multiplexing microring can effectively separate the TE_0 and TE_1 modes and has the ability of wavelength selection, which may be the main device for ultra-compact hybrid multiplexing technology in near future.

Key words: Silicon photonics; Optical communication; Wavelength division multiplexing; Mode division multiplexing; Hybrid multiplexing; Microring resonator; Mode splitter

OCIS Codes: 130.3120; 130.7405; 130.7408; 230.5750; 030.4070; 060.4510