

功率分配比大范围可调的光功率分配器集成芯片

廖莎莎^{1,2*}, 廖柯³, 包航¹, 张甜甜¹, 刘继伟¹, 廖希¹¹重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065;²东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 211189;³重庆声光电有限公司, 重庆 400060

摘要 光功率分配器(OPS)是光子集成电路的基本元件之一,广泛应用于多种领域。功率分配比(PSR)可调的 OPS 可提高光子集成电路的灵活性,简化光子集成电路系统。提出了一种硅基 PSR 大范围可调的 OPS 集成芯片方案,通过将对称 2×2 多模干涉仪、波导光栅和狭缝结构等硅基器件结合在一起,并改变输入光信号的波长和微型热光调制器两端加载的电压,实现了大范围可调的 PSR。实验结果表明,本方案得到的两种 OPS 结构可分别在 6.72 nm 和 5.56 nm 波长范围内实现 0.51~36.91 和 0.88~230.46 的 PSR 变化;在 50 °C 的温度变化下,可实现 8.58~29.75 和 5.01~425.43 的 PSR 变化。且该 OPS 具有尺寸小、质量轻、灵活性高等优势,可广泛应用于光开关、信道划分、功率分配等通信和信号处理领域。

关键词 集成光学; 分光器; 全光器件; 硅光子学; 光子集成电路

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0623001

Optical Power Splitter Integrated Chip with Large Tunable Range of Power Splitting Ratio

Liao Shasha^{1,2*}, Liao Ke³, Bao Hang¹, Zhang Tiantian¹, Liu Jiwei¹, Liao Xi¹¹ School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;² State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China;³ Chongqing Acoustic-Optic-Electronic CO., Ltd., Chongqing, 400060, China

Abstract Optical power splitter (OPS) is one of the basic components in photonic integrated circuits and it is widely used in many fields. The OPS with tunable power splitting ratio (PSR) can enhance the flexibility of photonic integrated circuits and simplify the photonic integrated circuit system. We propose an integrated chip scheme Si-based OPS with large tunable range of PSR. The scheme combines Si-based devices such as a symmetric 2×2 multimode interferometer, a waveguide grating, and a slot structure. By varying the wavelength of the input signal and adjusting the voltages applied at both ends of the thermo-optic micro modulator, the wide range adjustable PSR is realized. Experimental results show that the two OPS structure can obtain PSR changes 0.51–36.91 and 0.88–230.46 respectively within the wavelength range of 6.72 nm and 5.56 nm, respectively, and PSR changes of 8.58–29.75 and 5.01–425.43 in the temperature changes by 50 °C. The OPS has the advantages of small size, light weight, and high flexibility, which can be widely used in optical switch, channel division, power distribution and other communication and signal processing fields.

Key words integrated optics; beam splitters; all-optical devices; silicon photonics; photon integrated circuit

OCIS codes 130.3120; 230.1360; 230.1150

收稿日期: 2020-08-17; 修回日期: 2020-10-22; 录用日期: 2020-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(61801063)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN201800605)、重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0597)、东南大学毫米波国家重点实验室开放课题(K202005)

* E-mail: liaoss@cqupt.edu.cn

1 引言

光功率分配器(OPS)作为光子集成电路的基础元件^[1],广泛应用于信号监测^[2]、信号反馈^[3]、功率分配^[4-5]、无源光网络^[6-8]等领域。不同应用场景对 OPS 输出端口的输出功率比要求也不同,而输出功率比可用功率分配比(PSR)来表征。常见的 OPS 主要基于定向耦合器(DC)、Y 分支(Y-junction)和多模干涉仪(MMI)三种结构^[9-10],近年来,人们提出了多种 PSR 可调的 OPS 方案。Xu 等^[11]利用反向设计法,由所需的 PSR 反推出 1×2 MMI 中的多模波导区结构,可实现任意 PSR;Shang 等^[12]利用 SiN 材料制作了 3 层 Y 分支,通过改变各层间隙的大小,实现了 0.1~10 范围内的 PSR 变化;Ren 等^[13]通过级联多个 MMI 实现 OPS,通过改变级联个数和每级波导的长度,实现了 4~9 范围内的 PSR 变化;Chen 等^[14]通过切去 1×2 MMI 中多模波导的一个角实现了 0.05~0.25 范围内的 PSR 变化;Lin 等^[1]提出一种可实现任意 PSR 的 OPS 方案,该方案在 Y 分支的分叉处加入两个 S 波导,通过改变 S 波导的半径实现 PSR 的变化;Sia 等^[15]利用绝热模式变化器以及 Wang 等^[16]利用 3 根宽度、曲率均不同的波导相互耦合实现的 OPS 方案均由 DC 变化而来,PSR 变化范围在 1~2.33 内任意可调。上述方案具有结构紧凑、工作带宽大、损耗低等优点,但都是通过改变器件结构或尺寸实现 PSR 可调,器件制作完成后,无法再调节 PSR。Tajaldini 等^[17]利用非线性效应和 2×2 MMI 结构实现了 PSR 实时可调的 OPS,但该方案要求较大的输入光信号功率,且对温度等环境因素比较敏感。此外,热调/电调微环也可以实现可调 OPS^[18-19],但这类方案工作带宽窄、调节范围不大,为了增大调节范围还需要额外加入聚合物等,工艺复杂度较大。

本文提出了一种硅基 PSR 大范围可调的 OPS

集成芯片方案,在对称 2×2 MMI 的基础上加入波导光栅(WG)和狭缝结构(Slot),在不改变芯片结构的基础上,通过改变输入光信号的波长和微型热光调制器两端加载的电压,实现 PSR 大范围可调的 OPS。本方案得到的两种 OPS 结构包括波导光栅辅助多模干涉仪(WG-MMI)和波导光栅、Slot 辅助多模干涉仪(WG-Slot-MMI),可分别在 6.72 nm 和 5.56 nm 波长范围内实现 0.51~36.91 和 0.88~230.46 的 PSR 变化,并在 50 °C 的温度变化下,实现 8.58~29.75 和 5.01~425.43 的 PSR 变化。该 OPS 具有尺寸小、质量轻、灵活性高等优势,可广泛应用于光开关、信道划分、功率分配等通信和信号处理领域。

2 WG-MMI 型可调 OPS 的原理及仿真

2×2 MMI 是一种结构简单的集成器件,具有尺寸小、工作带宽大、损耗低、制作工艺简单和工艺容差大等优点,可作为模式转换器、光复用/解复用器、功率分配器、光开关、环形振荡器、马赫泽德干涉仪等器件的组成部件,实现不同的光信号处理功能,在光通信系统和光网络中有着广泛的应用^[20]。MMI 的功率分配基于自映像原理(Self-imaging effect),即入射信号在传播方向上周期性再现的现象。合理选择 MMI 多模波导区的宽度和长度,就能在输出端得到多个输入光信号的像,从而实现功率等分。如果 MMI 的多模波导区结构不对称,自映像的条件就会被打破,导致输出端功率出现不平衡现象。为了在输入光信号波长发生变化的情况下实现较大的 PSR 变化范围,将对波长变化敏感的 WG 制作在对称 2×2 MMI 多模波导区的一侧,实现 WG-MMI 型 OPS。为了增加该功率分配器的调节维度,在 WG 上加入热电极,其结构如图 1 所示。该 OPS 采用绝缘体上硅(SOI)材料,包含厚度为 220 nm 的上硅层和厚度为 $2 \mu\text{m}$ 的掩埋层。

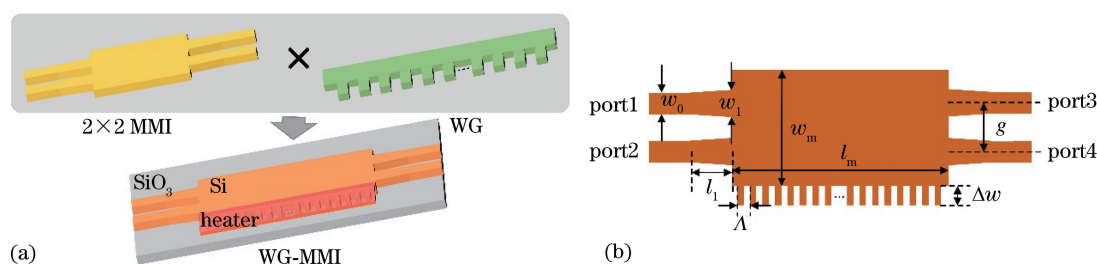


图 1 WG-MMI 型 OPS 的结构。(a) 三维示意图;(b) 俯视图及相关参数

Fig. 1 Structure of the WG-MMI type OPS. (a) Three-dimensional schematic diagram; (b) top view and related parameters

WG-MMI 型 OPS 中 2×2 MMI 的相关结构参数: 波导宽度 $w_0 = 500 \text{ nm}$, 锥形波导最宽处的宽度 $w_1 = 1.9 \text{ }\mu\text{m}$, 锥形波导的长度 $l_1 = 30 \text{ }\mu\text{m}$, 多模波导的宽度 $w_m = 4 \text{ }\mu\text{m}$, 多模波导的长度 $l_m = 56.5 \text{ }\mu\text{m}$, 相邻两输入/输出端口的间隔 $g = 2.068 \text{ }\mu\text{m}$, 波导的高度为 220 nm 。其中, Λ 为波导光栅的周期长度, Δw 为光栅梳齿宽度。

在 MMI 多模波导的一侧加入均匀波导光栅, 当光栅的结构参数发生变化时, 端口 3 和端口 4 的输出光功率会发生相应的变化。假设 N 为波导光栅的周期数, 光信号由端口 1 输入 OPS, 波长范围为 $1545 \sim 1555 \text{ nm}$, P_{o1} 为端口 4 的输出功率, P_{o2} 为端口 3 的输出功率。当 OPS 某一输出端的输出功率很小时, 输出功率的细微变化会引起两输出端功率比的剧烈变化, 但实际功率分配没有发生较大变化。因此, 在优化 OPS 结构参数时用两输出端功率之差 $\Delta P = P_{o1} - P_{o2}$ 来衡量功率分配的性能。

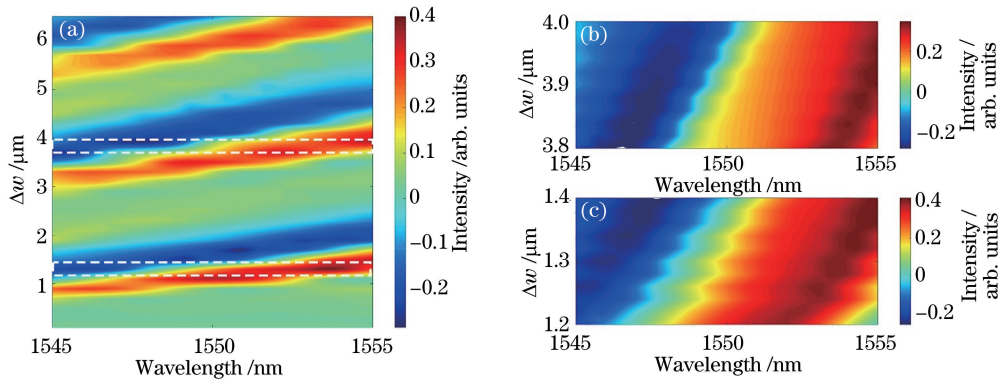


图 2 ΔP 随 Δw 和波长的变化曲线。(a) $\Delta w = 1 \sim 6.5 \text{ }\mu\text{m}$; (b) $\Delta w = 3.8 \sim 4.0 \text{ }\mu\text{m}$; (c) $\Delta w = 1.2 \sim 1.4 \text{ }\mu\text{m}$
 Fig. 2 Change curves of ΔP with Δw and wavelength. (a) $\Delta w = 1 \sim 6.5 \text{ }\mu\text{m}$;
 (b) $\Delta w = 3.8 \sim 4.0 \text{ }\mu\text{m}$; (c) $\Delta w = 1.2 \sim 1.4 \text{ }\mu\text{m}$

图 3 为 $\Delta w = 1.4 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $\Delta w = 3.8 \text{ }\mu\text{m}$, Λ 为 $0.29 \sim 0.31 \text{ }\mu\text{m}$ 时, ΔP 随 Λ 和输入光信号波长的变化曲线。可以发现, 当 $\Lambda = 0.3 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 两种情况下的 ΔP 变化最剧烈。图 4 为 N 对 OPS 功率分配的影响, 由于 MMI 多模波导的长度有限, 可以发

用 Lumerical 软件仿真了 Δw 对 OPS 功率分配的影响, 假设 $\Lambda = 0.3 \text{ }\mu\text{m}$, $N = 180$ 。当 Δw 由 $1 \text{ }\mu\text{m}$ 变化到 $6.5 \text{ }\mu\text{m}$ 时, ΔP 随 Δw 和输入光信号波长的变化曲线如图 2(a) 所示。可以发现, 在相同的波长范围内 ($1545 \sim 1555 \text{ nm}$), Δw 在 $1.2 \sim 1.4 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $3.8 \sim 4.0 \text{ }\mu\text{m}$ 两个区域的 ΔP 变化最剧烈, 如图 2(a) 中虚线框标出的区域。进一步增大该参数区域的仿真精度, 通过数值计算发现, 在图 2 (b) ($\Delta w = 3.8 \sim 4.0 \text{ }\mu\text{m}$) 中, $\Delta w = 3.8 \text{ }\mu\text{m}$ 时 ΔP 的变化最剧烈, 输入信号波长由 1546.53 nm 变化到 1553.52 nm 时, ΔP 由 -0.29 变化为 0.34 。图 2 (c) ($\Delta w = 1.2 \sim 1.4 \text{ }\mu\text{m}$) 中, $\Delta w = 1.4 \text{ }\mu\text{m}$ 时 ΔP 的变化最剧烈, 当输入信号波长由 1547.71 nm 变化到 1555 nm 时, ΔP 由 -0.26 变化为 0.42 。虽然在 $\Delta w = 1.4 \text{ }\mu\text{m}$ 时, ΔP 的变化范围较大, 但所需的波长变化量也较大, 因此仿真了 $\Delta w = 1.4 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $\Delta w = 3.8 \text{ }\mu\text{m}$ 两种情况下, Λ 对 OPS 功率分配的影响。

现, 当 $\Lambda = 0.3 \text{ }\mu\text{m}$ 时, N 的最大值为 188。
 图 4(a) 和 4(b) 分别为 $\Delta w = 1.4 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $\Delta w = 3.8 \text{ }\mu\text{m}$, $\Lambda = 0.3 \text{ }\mu\text{m}$, $N = 168 \sim 188$ 时, ΔP 随 N 和输入光信号波长的变化曲线。可以发现, 在图 4 (a) 中, $N = 188$ 时, ΔP 的变化最剧烈, 此时 P_{o1} 和

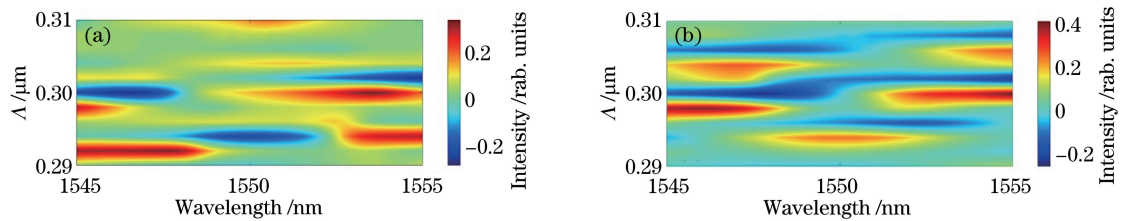


图 3 ΔP 随 Λ 和波长的变化曲线。(a) $\Delta w = 1.4 \text{ }\mu\text{m}$; (b) $\Delta w = 3.8 \text{ }\mu\text{m}$
 Fig. 3 Change curves of ΔP with Λ and wavelength. (a) $\Delta w = 1.4 \text{ }\mu\text{m}$; (b) $\Delta w = 3.8 \text{ }\mu\text{m}$

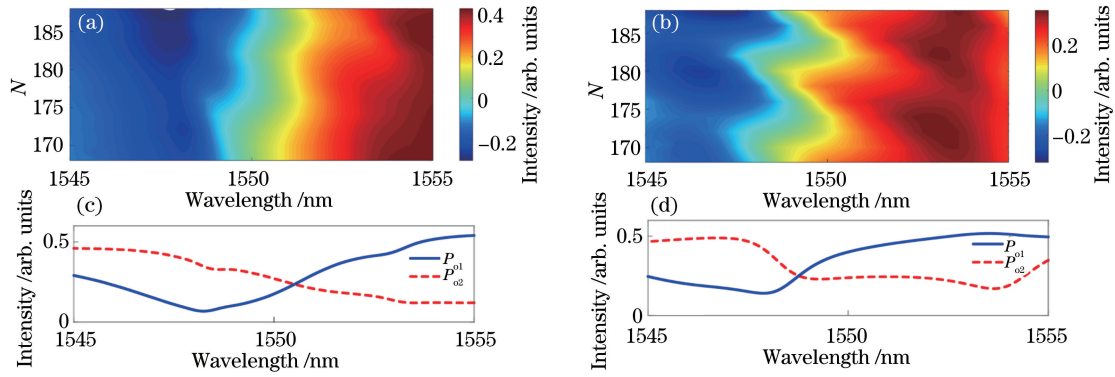


图 4 ΔP 随 N 和波长的变化曲线。(a) $\Delta w=1.4 \mu\text{m}, \Lambda=0.3 \mu\text{m}, N=168\sim 188$; (b) $\Delta w=3.8 \mu\text{m}, \Lambda=0.3 \mu\text{m}, N=168\sim 188$; (c)~(d) $N=188$ 时图(a)和图(b)中 P_{o1} 和 P_{o2} 随波长的变化曲线

Fig. 4 Change curves of ΔP with N and wavelength. (a) $\Delta w=1.4 \mu\text{m}, \Lambda=0.3 \mu\text{m}, N=168\sim 188$; (b) $\Delta w=3.8 \mu\text{m}, \Lambda=0.3 \mu\text{m}, N=168\sim 188$; (c)~(d) When $N=188$, change curves of P_{o1} and P_{o2} with wavelength in Fig. (a) and Fig. (b)

P_{o2} 的变化曲线如图 4(c) 所示。当输入信号的波长为 1547.77 nm 时, $\Delta P = -0.30, P_{o1} = 0.09, P_{o2} = 0.39$; 当输入信号的波长为 1555 nm 时, $\Delta P = 0.42, P_{o1} = 0.54, P_{o2} = 0.12$ 。这表明只需将输入信号的波长改变 7.23 nm, 就能使 PSR (P_{o1}/P_{o2}) 由 0.23 变化为 4.47。在图 4(b) 中, $N=188$ 时, ΔP 的变化最剧烈, 此时 P_{o1} 和 P_{o2} 的变化曲线如图 4(d) 所示。当输入信号的波长为 1547.25 nm 时, $\Delta P = -0.32, P_{o1} = 0.16, P_{o2} = 0.48$; 当输入信号的波长为 1553.6 nm 时, $\Delta P = 0.35, P_{o1} = 0.52, P_{o2} = 0.17$, 这表明只需将输入信号的波长改变 6.35 nm, 就能使 PSR 由 0.33 变化为 3.05。

除了改变输入光信号的波长, 还可通过热光效应改变 PSR。假设结构参数①: $\Delta w = 1.4 \mu\text{m}, \Lambda = 0.3 \mu\text{m}, N = 188$, 结构参数②: $\Delta w = 3.8 \mu\text{m}, \Lambda = 0.3 \mu\text{m}, N = 188$ 。WG 区域温度改变 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 两种结构参数的 PSR 变化情况如图 5 所示。可以发现, 图 5(a) 中 PSR 随温度的变化率为 $-3.53 \times 10^{-2} \sim 8.00 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 当输入光信号波长为 1553.12 nm 时, PSR 的变化量最大, 由 2.17 变化至 3.94; 图 5(b) 中 PSR 随温度的变化率为 $-2.36 \times 10^{-2} \sim 2.96 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 当输入光信号波长为 1555 nm 时, PSR 的变化量最大, 由 2.98 变化为 1.50。这表明该功率分配器可利用热调的方式微调 PSR。

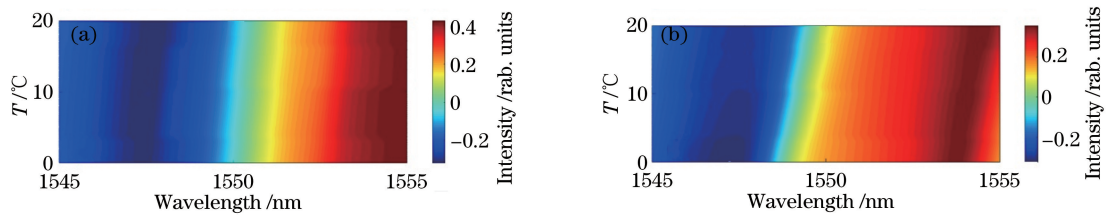


图 5 PSR 随 WG 区域温度和波长的变化曲线。(a) 结构参数①; (b) 结构参数②

Fig. 5 Change curves of PSR with the temperature of WG area and wavelength. (a) Structural parameters①; (b) structural parameters②

3 WG-Slot-MMI 型可调 OPS 的原理

上述结果表明, 在对称 MMI 多模波导的一侧加入 WG, 可以打破 MMI 的对称性, 从而改变 PSR。为了进一步加大 PSR 的可调范围, 在 MMI 的多模波导区中加入一段 Slot 结构, 其结构如图 6 所示。Slot 将多模波导拆分成两条波导, 且两条波导间会发生耦合, 耦合系数由 Slot 的结构参数和光信号波长决定。选择合适的 Slot 长度、宽度和起始位置, 可以增大 PSR 随波长的变化范围。假设 Slot

制作在 MMI 多模波导的中间, 即 Slot 与端口 1 和端口 2 的距离是相同的。Slot 左端距离 MMI 多模波导左端的距离为 q , Slot 的长为 l_s , 宽为 w_s 。同样在 WG 上制作了热电极, 以增加 PSR 的调节维度。优化上述结构参数, 以达到最大的 PSR 变化。

首先, 仿真了 l_s 对 ΔP 的影响, 假设 $q=0 \mu\text{m}, w_s=0.5 \mu\text{m}$ 。当 l_s 由 $2.5 \mu\text{m}$ 变化到 $27.5 \mu\text{m}$ 时, ΔP 随 l_s 和输入光信号波长的变化曲线如图 7(a) 和 7(b) 所示, 其中, 图 7(a) 中 WG 为结构参数①, 图 7(b) 中 WG 为结构参数②。可以发现, 在相同

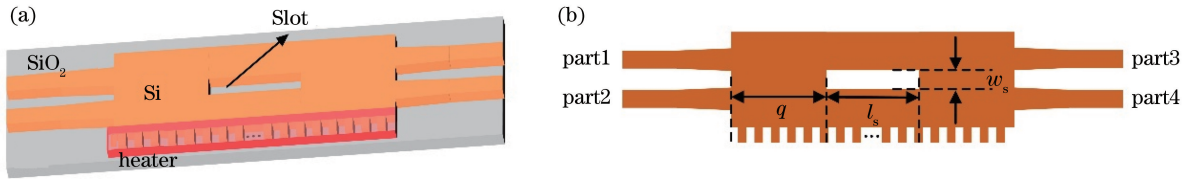


图 6 WG-Slot-MMI 型 OPS 的结构。(a) 三维示意图;(b)俯视图及相关参数

Fig. 6 Structure of the WG-Slot-MMI type OPS. (a) Three-dimensional schematic diagram; (b) top view and related parameters

的波长范围内(1545~1555 nm),对于结构参数①, $l_s=20.5\sim 24.5\ \mu\text{m}$ 区域的 ΔP 变化最剧烈,即图 7 (a)中虚线框标出的区域。将该区域的仿真精度加大,可以发现,在图 7(c) ($l_s=20.5\sim 24.5\ \mu\text{m}$) 中, $l_s=22.9\ \mu\text{m}$ 时 ΔP 的变化最剧烈,当输入信号波

长由 1545 nm 变化为 1554.57 nm 时, ΔP 由 0.67 变化为 -1.87×10^{-3} 。对于结构参数②,在图 7(d) ($l_s=22.5\sim 25\ \mu\text{m}$) 中, $l_s=22.5\ \mu\text{m}$ 时 ΔP 的变化最剧烈,当输入信号波长由 1547.64 nm 变化为 1553.54 nm 时, ΔP 由 0.70 变化为 0.08。

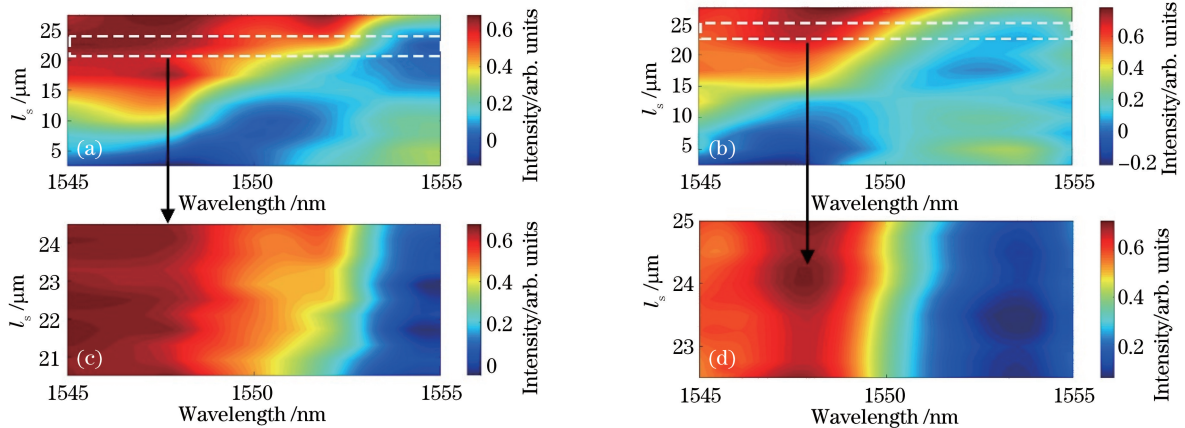


图 7 ΔP 随 l_s 和波长的变化曲线。(a)结构参数①($l_s=2.5\sim 27.5\ \mu\text{m}$);(b)结构参数②($l_s=2.5\sim 27.5\ \mu\text{m}$); (c) 结构参数①($l_s=20.5\sim 24.5\ \mu\text{m}$);(d) 结构参数②($l_s=22.5\sim 25\ \mu\text{m}$)

Fig. 7 Change curves of ΔP with l_s and wavelength. (a) Structure parameter① ($l_s=2.5\sim 27.5\ \mu\text{m}$); (b) structure parameter② ($l_s=2.5\sim 27.5\ \mu\text{m}$); (c) structure parameter① ($l_s=20.5\sim 24.5\ \mu\text{m}$); (d) structure parameter② ($l_s=22.5\sim 25\ \mu\text{m}$)

为了研究 w_s 和 q 对 ΔP 的影响,仿真了两种结构参数下 ΔP 随 w_s 和输入光信号波长的变化曲线,结果如图 8 所示。可以发现, w_s 分别在 $0.64\sim 0.74\ \mu\text{m}$ 和 $0.6\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 区域内 ΔP 的变化最剧烈。在图 8(c) ($w_s=0.64\sim 0.74\ \mu\text{m}$) 中, $w_s=0.68\ \mu\text{m}$ 时 ΔP 的变化最剧烈,当输入信号波长由 1547.92 nm 变化到 1554.64 nm 时, ΔP 由 0.69 变化为 -0.24 。在图 8(d) ($0.6\sim 0.7\ \mu\text{m}$) 中, $w_s=0.64\ \mu\text{m}$ 时 ΔP 的变化最剧烈,当输入信号波长由 1546.48 nm 变化到 1552.04 nm 时, ΔP 由 0.72 变化为 -0.05 。

ΔP 随 q 和输入光信号波长的变化情况如图 9 所示,图 9(a)和 9(b)分别为两种结构参数下 ΔP 的

变化曲线。可以发现,在图 9(a)中, $q=0\ \mu\text{m}$ 时, ΔP 的变化最剧烈,此时 P_{o1} 和 P_{o2} 的变化曲线如图 9(c)所示。当输入信号波长为 1547.92 nm 时, $P_{o1}=0.71, P_{o2}=0.02$; 输入信号波长为 1554.64 nm 时, $P_{o1}=0.25, P_{o2}=0.49$ 。这表明只需将输入信号的波长改变 6.72 nm,就可以使 PSR 由 36.91 变化至 0.51。在图 9(b)中, $q=0\ \mu\text{m}$ 时, ΔP 的变化最剧烈,此时 P_{o1} 和 P_{o2} 的变化曲线如图 9(d)所示。当输入信号波长为 1546.48 nm 时, $P_{o1}=0.72, P_{o2}=3.12\times 10^{-3}$; 输入信号波长为 1552.04 nm 时, $P_{o1}=0.35, P_{o2}=0.40$ 。这表明只需将输入信号的波长改变 5.56 nm,就可以使 PSR 由 230.46 变化至 0.88。

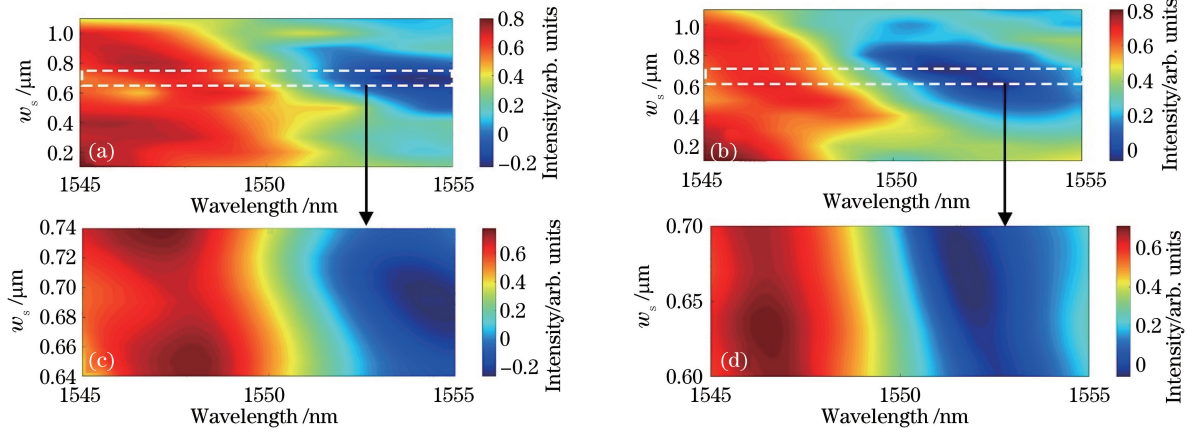


图 8 ΔP 随 w_s 和波长变化曲线。(a) 结构参数① ($l_s = 22.9 \mu\text{m}$, $w_s = 0.1 \sim 1.1 \mu\text{m}$); (b) 结构参数② ($l_s = 22.5 \mu\text{m}$, $w_s = 0.1 \sim 1.1 \mu\text{m}$); (c) 结构参数① ($l_s = 22.9 \mu\text{m}$, $w_s = 0.64 \sim 0.74 \mu\text{m}$); (d) 结构参数② ($l_s = 22.5 \mu\text{m}$, $w_s = 0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$)
 Fig. 8 Change curves of ΔP with w_s and wavelength. (a) Structure parameter ① ($l_s = 22.9 \mu\text{m}$, $w_s = 0.1 \sim 1.1 \mu\text{m}$); (b) structure parameter ② ($l_s = 22.5 \mu\text{m}$, $w_s = 0.1 \sim 1.1 \mu\text{m}$); (c) structure parameter ① ($l_s = 22.9 \mu\text{m}$, $w_s = 0.64 \sim 0.74 \mu\text{m}$); (d) structure parameter ② ($l_s = 22.5 \mu\text{m}$, $w_s = 0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$)

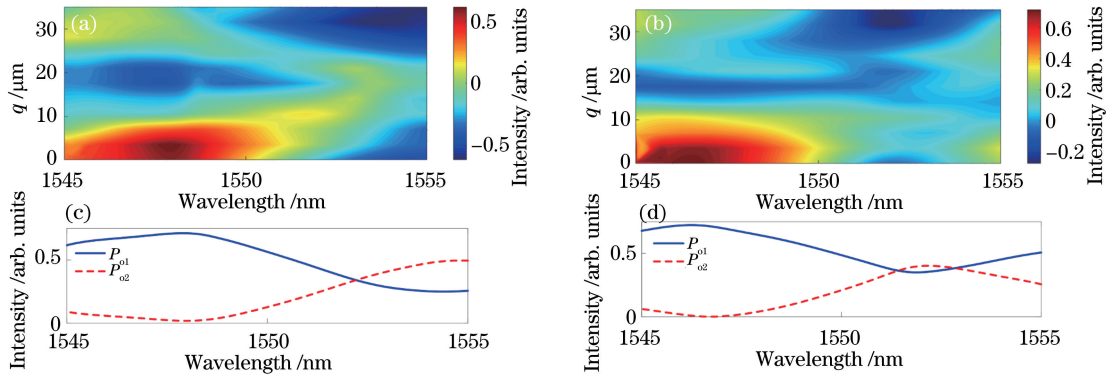


图 9 ΔP 随 q 和波长的变化曲线。(a) 结构参数①, $l_s = 22.9 \mu\text{m}$, $w_s = 0.68 \mu\text{m}$, $q = 0 \sim 35 \mu\text{m}$; (b) 结构参数②, $l_s = 22.5 \mu\text{m}$, $w_s = 0.64 \mu\text{m}$, $q = 0 \sim 35 \mu\text{m}$; (c)~(d) $q = 0 \mu\text{m}$ 时图(a)和图(b)中 P_{o1} 和 P_{o2} 随波长变化曲线
 Fig. 9 Change curves of ΔP with q and wavelength. (a) Structure parameter ①, $l_s = 22.9 \mu\text{m}$, $w_s = 0.68 \mu\text{m}$, $q = 0 \sim 35 \mu\text{m}$; (b) structure parameter ②, $l_s = 22.5 \mu\text{m}$, $w_s = 0.64 \mu\text{m}$, $q = 0 \sim 35 \mu\text{m}$; (c)~(d) When $q = 0 \mu\text{m}$, change curves of P_{o1} and P_{o2} with wavelength in Fig. (a) and Fig. (b)

图 10 为 WG-Slot-MMI 结构参数分别在 $\Delta w = 1.4 \mu\text{m}$, $\Lambda = 0.3 \mu\text{m}$, $N = 188$, $l_s = 22.9 \mu\text{m}$, $w_s = 0.68 \mu\text{m}$, $q = 0 \mu\text{m}$ (结构参数③) 和 $\Delta w = 3.8 \mu\text{m}$, $\Lambda = 0.3 \mu\text{m}$, $N = 188$, $l_s = 22.5 \mu\text{m}$, $w_s = 0.64 \mu\text{m}$, $q = 0 \mu\text{m}$ (结构参数④) 两种情况下,

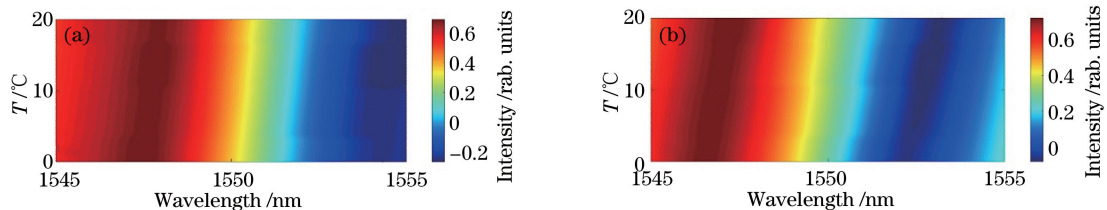


图 10 PSR 随 WG 区域温度和波长的变化曲线。(a) 结构参数③; (b) 结构参数④
 Fig. 10 Change curves of PSR with the temperature of WG and wavelength. (a) Structure parameter ③; (b) structure parameter ④

PSR 随 WG 区域温度的变化的曲线。可以发现, 图 10(a) 中 PSR 随温度的变化率为 $-0.36 \sim 0.42 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 当输入光信号波长为 1548.94 nm 时, PSR 的变化量最大, 由 29.75 变化至 8.58 ; 图 10(b) 中 PSR 随温度的变化率为 $-5.98 \sim 8.41 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 当

输入光信号波长为 1548.98 nm 时, PSR 的变化量最大, 由 5.01 变化至 420.42。这表明在不改变该功率分配器结构的情况下, 可利用热调方式大幅度调节 PSR。

表 1 列举了 4 种结构 OPS 的性能指标, 可以发

现, 在波长调控和温度调控两种方式下, 具有 Slot 结构的 OPS 性能更优。虽然结构参数④ OPS 的 PSR 调节范围更广, 但结构参数③ OPS 的 ΔP 变化范围更大, 可根据实际应用选取不同结构参数的 OPS。

表 1 不同 OPS 的性能指标

Table 1 Performance indicators of different OPSs

| Type | Structure parameter | Wavelength variation /nm | ΔP | Tunable range of PSR varies with wavelength | Temperature coefficient of PSR / $^{\circ}\text{C}^{-1}$ | Maximum tunable range of PSR varies with temperature |
|-------------|---------------------|--------------------------|------------|---|--|--|
| WG-MMI | ① | 7.23 | -0.30-0.42 | 0.23-4.47 | -3.52×10^{-2} - 8.00×10^{-3} | 2.17-3.94 |
| WG-MMI | ② | 6.35 | -0.32-0.35 | 0.33-3.05 | -2.36×10^{-2} - 2.96×10^{-2} | 2.98-1.50 |
| WG-Slot-MMI | ③ | 6.72 | 0.69-0.24 | 36.91-0.51 | -0.36-0.42 | 29.75-8.58 |
| WG-Slot-MMI | ④ | 5.56 | 0.72-0.05 | 230.46-0.88 | -5.98-8.41 | 5.01-425.43 |

4 结 论

提出了一种硅基 PSR 大范围可调的 OPS 集成芯片方案, 通过选取合适的 WG、Slot 结构参数, 并改变输入光信号的波长, 实现了 PSR 最大调节范围分别为 0.51 ~ 36.91 (结构参数③, 波长由 1547.92 nm 变化至 1554.64 nm) 和 0.88 ~ 230.46 (结构参数④, 波长由 1546.48 nm 变化至 1552.04 nm) 的 OPS。此外, 通过控制芯片中微型热光调制器也可以对 OPS 输出光信号功率进行调节。在 50 $^{\circ}\text{C}$ 的温度变化范围内, PSR 的最大变化范围分别为 8.58 ~ 29.75 (结构参数③, 波长为 1548.94 nm) 和 5.01 ~ 425.43 (结构参数④, 波长为 1548.98 nm), 热调系数分别为 0.42 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 和 8.41 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。该 OPS 具有尺寸小、质量轻、灵活性高等优势, 可广泛应用于光开关、信道划分、功率分配等通信与信号处理领域。

参 考 文 献

- [1] Lin Z J, Shi W. Broadband, low-loss silicon photonic Y-junction with an arbitrary power splitting ratio[J]. Optics Express, 2019, 27(10): 14338-14343.
- [2] Velha P, Soriano V, Preite M V, et al. Wide-band polarization controller for Si photonic integrated circuits[J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5656-5659.
- [3] Doerr C R, Fontaine N K, Buhl L L. PDM-DQPSK silicon receiver with integrated monitor and minimum number of controls[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(8): 697-699.
- [4] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. Nature, 2013, 493(7431): 195-199.
- [5] Lin Z J, Rusch L, Chen Y X, et al. Chip-scale, full-Stokes polarimeter [J]. Optics Express, 2019, 27(4): 4867-4877.
- [6] Li C H, Wu Y T, Yu Y, et al. Dynamic encryption scheme based on channel phase information in OFDM-PON system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1006004.
李春华, 吴雅婷, 余衍, 等. OFDM-PON 系统中基于信道相位信息的动态加密方案[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1006004.
- [7] Tang M Z, Sun H, He R X, et al. Energy-efficient dynamic wavelength and bandwidth allocation algorithm supporting differentiated services for TWDM-PON[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 180601.
唐明珠, 孙皓, 何荣希, 等. TWDM-PON 中支持区分服务的节能动态波长带宽分配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 180601.
- [8] Han M X, Wu Y T, Zhang Q W, et al. Secure algorithm for suppressing peak-to-average power ratio in OFDM-PON systems [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0506004.
韩梦欣, 吴雅婷, 张倩武, 等. OFDM-PON 系统中一种抑制峰均功率比的安全算法[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0506004.
- [9] Xu K, Liu L, Wen X, et al. Integrated photonic power divider with arbitrary power ratios[J]. Optics Letters, 2017, 42(4): 855-858.
- [10] Zanzi A, Brimont A, Griol A, et al. Compact and low-loss asymmetrical multimode interference splitter for power monitoring applications [J]. Optics Letters, 2016, 41(2): 227-229.
- [11] Xu K, Liu L, Wen X, et al. All passive photonic power divider with arbitrary split ratio [EB/OL].

- [2020-08-03]. <https://www.researchgate.net/publication/308066540>.
- [12] Shang K P, Pathak S, Liu G Y, et al. Silicon nitride tri-layer vertical Y-junction and 3D couplers with arbitrary splitting ratio for photonic integrated circuits[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10474-10483.
- [13] Ren F, Chen W, Zhangsun T W, et al. Variable-ratio mode-insensitive 1×2 power splitter based on MMI couplers and phase shifters[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(5): 1-12.
- [14] Chen R X, Deng Q Z, Zhou Z P. Ultra low loss asymmetric multimode interference power splitters [C] // 2018 IEEE 15th International Conference on Group IV Photonics (GFP), August 29-31, 2018, Cancun, Mexico. New York: IEEE Press, 2018: 1-2.
- [15] Sia J X B, Wang W J, Guo X, et al. Mid-infrared, ultra-broadband, low-loss, compact arbitrary power splitter based on adiabatic mode evolution[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(2): 1-11.
- [16] Wang H T, Chen C F, Chi S E. A numerical solution for broadband PLC splitter with variable splitting ratio based on asymmetric three waveguide structures [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(9): 1892.
- [17] Tajaldini M, Jafri M Z M. Arbitrary-ratio power splitter based on nonlinear multimode interference coupler[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2015, 1657(1): 140005.
- [18] Peter E, Thomas A, Dhawan A, et al. Active microring based tunable optical power splitters [J]. *Optics Communications*, 2016, 359: 311-315.
- [19] Ghosh R R, Bashir J, Sarangi S R, et al. SpliESR: tunable power splitter based on an electro-optic slotted ring resonator [J]. *Optics Communications*, 2019, 442: 117-122.
- [20] Zheng Y, Shum P P, Luo Y Y, et al. High-resolution, large-dynamic-range multimode interferometer sensor based on a suspended-core microstructured optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(4): 1017-1020.