

基于PSO算法的硅基C波段低损耗紧凑型偏振分束旋转器

惠战强^{1,2*}, 李斌^{1,2}, 李田甜^{1,2}, 韩冬冬^{1,2}, 巩稼民^{1,2}

(1. 西安市微波光子与光通信重点实验室, 陕西 西安 710121;
2. 西安邮电大学, 电子工程学院, 陕西 西安 710121)

摘要:提出了一种基于模式演变原理的紧凑型偏振分束旋转器(Polarization Splitter Rotator, PSR)。该器件由锥形 TM_0-TE_1 模式转换器与非对称定向耦合(Asymmetric Directional Coupler, ADC)结构的模式分束器组成,经粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)和样条插值原理优化后的器件总长度仅为 $45\ \mu\text{m}$ 。利用时域有限差分法(Finite Difference Time Domain method, FDTD)对器件进行仿真,数值结果表明:输入 TE_0 模式时,在 $100\ \text{nm}$ ($1500\sim 1600\ \text{nm}$)带宽内具有低插入损耗($<0.007\ \text{dB}$)、低串扰($<-28.7\ \text{dB}$)、高偏振消光比($>49.1\ \text{dB}$);输入 TM_0 模式时,在整个C波段内具有低插入损耗($<0.34\ \text{dB}$)、低串扰($<-47.1\ \text{dB}$)、高偏振消光比($>15.5\ \text{dB}$),且在中心波长 $1550\ \text{nm}$ 处插入损耗值仅为 $0.06\ \text{dB}$ 。此外,对器件的公差进行了分析,结果表明该器件具有良好的鲁棒性。所设计的PSR具备低损耗、小尺寸以及低串扰特性,在未来大规模光子集成领域具有重要应用价值。

关键词:偏振分束旋转器;粒子群算法;时域有限差分法

中图分类号:TN252

文献标识码:A

Silicon-based C-band low-loss compact polarization splitter rotator based on PSO algorithm

HUI Zhan-Qiang^{1,2*}, LI Bin^{1,2}, LI Tian-Tian^{1,2}, HAN Dong-Dong^{1,2}, GONG Jia-Min^{1,2}

(1. Xi'an Key Laboratory of Microwave Photon and Optical Communication, Xi'an, 710121, China;
2. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, 710121, China)

Abstract: A compact polarization splitter rotator (PSR) based on the principle of mode evolution is proposed. The device consists of a tapered TM_0-TE_1 mode converter and a mode splitter with an asymmetric directional coupler (ADC) structure, optimized by particle swarm optimization (PSO) and the principle of spline interpolation. The device is simulated using the finite difference time domain method (FDTD). The numerical results show: for TE_0 mode input, a low insertion loss ($<0.007\ \text{dB}$), low crosstalk ($<-28.7\ \text{dB}$), and high polarization extinction ratio ($>49.1\ \text{dB}$) in the $100\ \text{nm}$ ($1500\sim 1600\ \text{nm}$) bandwidth is achieved within a device length of only $45\ \mu\text{m}$. On the other hand, for TM_0 mode input, a low insertion loss ($<0.34\ \text{dB}$), low crosstalk ($<-47.1\ \text{dB}$), and high polarization extinction ratio ($>15.5\ \text{dB}$) in the whole C-band is achieved. The insertion loss value at $1550\ \text{nm}$ is reduced to $0.06\ \text{dB}$. In addition, the tolerance of the device is analyzed and the results reveal that the proposed device is robust. The designed PSR has small loss, compact size, and low crosstalk, which are important for future applications in large-scale photonic integration.

Key words: polarization splitter rotator, particle swarm optimization, finite difference time domain

收稿日期:2022-06-03,修回日期:2022-11-06

Received date:2022-06-03, Revised date:2022-11-06

基金项目:国家自然科学基金(61875165);陕西省重点研发计划项目(2022GY-008);陕西省国际合作与交流项目(2020KWZ-017);陕西省教育厅协同创新项目(20JY060)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61875165); the Key Research and Development Projects of Shaanxi Province (2022GY-008); the International Cooperation and Exchange Projects of Shaanxi Province (2020KWZ-017); the Collaborative Innovation Projects of Education Office of Shaanxi Province (20JY060)

作者简介(Biography):惠战强(1978-),男,陕西渭南人,博士,教授,主要研究领域为光纤通信与微纳光子器件。

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: zhanqianghui@xupt.edu.cn

引言

近年来,硅基光子器件以其低功耗、小体积和便于片上集成等诸多优势得到了广泛关注,在数据中心光互连、信息实时智能感知以及光电混合加速计算芯片等领域呈现出诱人的应用前景。绝缘体上硅(Silicon On Insulator, SOI)是一种重要的硅光集成平台,它具有折射率对比度高、与互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺兼容和易于实现大规模光子集成等优势^[1, 2],但 SOI 波导芯层与包层之间的高折射率差会造成偏振模色散(Polarization Mode Dispersion, PMD)以及偏振相关损耗(Polarization Dependent Loss, PDL)等偏振敏感问题^[3, 4],最终导致光通信系统性能下降。目前,针对此类偏振敏感问题的解决方案有两种:一种是在回路中使用偏振无关器件^[5-7],即光波的偏振态变化对器件工作性能无影响;另一种则是使用偏振分集系统^[8-11],即利用偏振调控器件(偏振分束器与偏振旋转器等)调控光波的偏振态,最终实现系统性能不受偏振态变化影响。偏振分束旋转器(Polarization Splitter Rotator, PSR)可同时满足偏振分束与偏振旋转的功能,是一种高效的偏振调控器件。目前,偏振分束旋转器已广泛应用于波分复用系统^[12]、偏振复用系统^[13]以及相干光通信系统^[14]中,对进一步提升光通信系统的速率和容量起着关键作用。

目前,国内外有关 PSR 的设计与应用已有很多报道,PSR 按照其工作原理可以划分为两类:模式耦合型^[15-24]与模式演变型^[25-38]。模式耦合型 PSR 利用非对称条型波导^[15-17]、非对称刻蚀波导^[18-20]、亚波长光栅^[21, 22]、弯曲波导^[23]、倾斜波导^[24]等结构使得两个正交偏振态直接发生耦合,但其具有的波长敏感性和特殊的波导结构使得该器件的工作带宽较窄且制作复杂,要提高该类型 PSR 的工作带宽就必须增大器件尺寸,不利于实现大规模光子集成。而模式演变型 PSR 一般分两步实现偏振分束旋转过程:首先利用锥型波导区的模式杂化效应实现 TM_0 模式到 TE_1 模式的转变,再利用非对称定向耦合器(Asymmetric Directional Coupler, ADC)^[25-29]、多模干涉(Multiple Mode Interference, MMI)耦合器^[30]、Y 分支耦合器^[31-33]和亚波长光栅(Sub-wavelength Grating, SWG)^[34]等结构实现模式的分离(同时完成从高阶模到基模的转换)。基于模式演变型的 PSR 通常具有较宽的带宽以及较大的工艺制作误差,前人对模

式演变型的 PSR 已开展了大量研究。2011 年, Dai 等人^[25]提出一种三段式锥型波导结合 ADC 结构的 PSR,器件长度为 $71 \mu\text{m}$,在 70 nm 带宽内偏振消光比大于 10 dB ;2013 年, Ding 等人^[30]提出一种锥型波导结合 2×2 的 MMI 耦合器结构的 PSR,器件长度为 $153.7 \mu\text{m}$,在 100 nm 带宽内插入损耗小于 2.5 dB ,串扰小于 -12 dB ;2014 年, Wang 等人^[31]提出一种锥型脊波导结合 Y 分支结构的 PSR,器件长度为 $95 \mu\text{m}$,在 400 nm 带宽内插入损耗小于 0.4 dB ,偏振消光比大于 12 dB ;2016 年, Sun 等人^[32]提出一种双层绝热锥型波导结合 Y 分支结构的 PSR,器件长度为 $272 \mu\text{m}$,在 100 nm 带宽内插入损耗小于 1 dB ,串扰小于 -14 dB ;2019 年, Ma 等人^[34]提出一种三段式锥型波导结合 SWG 结构的 PSR,器件长度 $151 \mu\text{m}$,在中心波长 1550 nm 处插入损耗为 0.5 dB ,在 74 nm 带宽内串扰小于 -19 dB ;2021 年, Lu 等人^[29]提出一种基于氮化硅平台的 PSR,器件长度大于 $2000 \mu\text{m}$,在 C 波段内实现了偏振消光比大于 17 dB 。

粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法是一种基于迭代的多目标优化算法,具有精度高、收敛快和易实现等优点,已广泛应用于各种光器件的设计与优化中。其基本原理为:首先生成一组原始随机粒子(随机解),每个粒子具备三个属性:速度、位置、适应度值,速度代表移动的快慢,位置代表移动的方向,适应度值由被优化的函数决定。在每次迭代的过程中,粒子群中的所有粒子根据个体找到的最佳位置和整个粒子群共享的全局位置来更新自身的速度和位置。周而复始,依据全局最优位置便会找到单个粒子的最佳位置,从而不断搜索出最优解。PSO 主要用于解决多结构参数优化问题,通过设置参数优化边界以及优化函数,根据器件所需功能,通过迭代自动找出满足功能的目标参数。最近,利用 PSO 优化算法设计 PSR 成为一个新的热点。2018 年, Guo 等人^[27]提出一种基于绝热脊型波导的 PSR,采用 PSO 算法对器件结构进行优化,器件长度为 $130 \mu\text{m}$,实现了在 200 nm 带宽内插入损耗小于 0.5 dB ,串扰小于 -50 dB ;2021 年, Bustamante 等人^[36]提出一种具有领结型模式转换器的 PSR,用 PSO 算法对结构进行了优化,器件长度为 $62.8 \mu\text{m}$,在 60 nm 带宽内插入损耗小于 0.9 dB ,串扰小于 -20 dB 。从以上研究可以看出,无论采用传统结构还是算法自动优化所设计的 PSR 均存在尺寸过大($>50 \mu\text{m}$),或损耗较高等问题,不能同时兼

顾实际工程应用对器件提出的低损耗、小尺寸等要求。

本文提出一种基于模式演变原理,在C波段内具有低损耗、低串扰以及高偏振消光比的紧凑型偏振分束旋转器。在SOI平台上采用空气包层打破波导的垂直对称性,使用PSO算法与样条插值优化原理对器件的结构参数进行优化,最终在器件长度仅为45 μm 时实现了偏振分束旋转功能。利用时域有限差分法(Finite Difference Time Domain method, FDTD)对器件进行性能仿真与公差分析,结果表明:当输入 TE_0 模式时,在1500~1600 nm波段内插入损耗均小于0.007 dB,串扰低于-28.7 dB,偏振消光比大于49.1 dB;当输入 TM_0 模式时,在整个C波段内插入损耗均小于0.34 dB,串扰低于-47.1 dB,偏振消光比大于15.5 dB,在中心波长处(1550 nm)插入损耗值仅为0.06 dB,同时,器件具有较大的制造公差。

1 器件结构及原理

该器件基于顶层硅厚220 nm的标准SOI晶圆,空气作为上包层。图1(a)、(b)所示分别为所设计的PSR的三维图以及侧视图,其中,红色部分为硅,灰色部分为二氧化硅。该器件由 TM_0 - TE_1 模式转换器和模式分束器两部分组成。 TM_0 - TE_1 模式转换器部分由多段长度相等的微型锥波导组成,总长度为 L_1 ,每个锥型波导的入射宽度与出射宽度均不相等。随着锥型波导宽度的增加,波导中的模式杂化现象导致无法区分 TM_0 与 TE_1 模式,从而产生混合模,混合模的模式杂化程度用模式偏振度来描述,其分为 x 和 y 偏振方向两种。一般而言,沿 x 方向的模式偏振度定义为波导中 x 方向电场能量与横截面总体电场能量之比,如下式所示^[33]:

$$\gamma_x = \frac{\iint |E_x^2| dx dy}{\iint |E_x^2| dx dy + \iint |E_y^2| dx dy}, \quad (1)$$

(1)式中, E_x 与 E_y 分别是波导横截面上本征模的横向与纵向电场分量。对于 TM_0 模式,其 y 方向上的电场分量占主导,即 $\gamma_x \approx 0$;对于 TE_0 模式,其 x 方向上的电场分量占主导,即 $\gamma_x \approx 1$ 。然而,模式杂化区混合模的 γ_x 处于0到1之间。

为了进一步分析波导中混合模的传输及耦合行为,一般采用超模理论。定义归一化超模(A_{s1} 和 A_{s2})表示波导中两个独立未干扰的 TM_0 与 TE_1 模式的振幅,如下式所示^[33]:

$$A_{s1}(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{(1-2\delta/\Delta\beta)}}{\sqrt{(1+2\delta/\Delta\beta)}} \right) e^{-j\beta_{s1}z}, \quad (2)$$

$$A_{s2}(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{-\sqrt{(1+2\delta/\Delta\beta)}}{\sqrt{(1-2\delta/\Delta\beta)}} \right) e^{-j\beta_{s2}z}, \quad (3)$$

其中, $\delta = (\beta_{\text{TM}_0} - \beta_{\text{TE}_1})/2$, $\Delta\beta = 2\sqrt{\delta^2 + \kappa^2} = \beta_{s1} - \beta_{s2}$, β 代表模式传播常数, κ 表示两个未干扰模式之间的耦合系数。当 $\delta > 0$ 或 $\delta < 0$ 时,不会发生模式混合,模式基本由 TM_0 或 TE_1 表示;当 $\delta = 0$ 时,两种模式相位匹配,在此处模式杂化最强。模式分束器部分采用了非对称定向耦合器结构,长度为 L_2 ,由左、右两根波导组成,考虑到当前工艺限制,设置两耦合波导之间的间隔 g 为100 nm。定向耦合器的耦合效率随着长度的增加周期性变化,一个周期的长度称为拍长。传输中具有不同传播常数的模式之间发生干扰,经拍长 L_π 后,一个波导中的模式会耦合到另一波导中, L_π 由下式计算^[33]:

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_{\text{TE}_1} - \beta_{\text{TE}_0}} = \frac{\lambda}{2(n_{\text{TE}_1} - n_{\text{TE}_0})}, \quad (4)$$

其中, n_{TE_1} 和 n_{TE_0} 分别代表 TE_1 和 TE_0 模式的有效折射率。为了实现高效率的相位匹配,通过调整左、右波导的结构参数,保证右波导中的 TE_1 模式与左波导中的 TE_0 模式两者有效折射率差最小,尽可能达到 $|n_{\text{TE}_1} - n_{\text{TE}_0}| = 0$ 。

该PSR的工作原理如下:当注入 TE_0 模式时,由于相位失配,入射光在Through端口处以 TE_0 模式输出;当注入 TM_0 模式时, TM_0 偏振光首先会经过模式转换器部分,在该部分发生模式杂化现象,将 TM_0 模式转换为 TE_1 模式,然后在模式分束器部分, TE_1 模式会与左侧波导中的 TE_0 基模发生模式耦合,最终在Cross端口处获得 TE_0 模式输出。

2 器件结构优化

2.1 TM_0 - TE_1 模式转换器

TM_0 - TE_1 模式转换器结构中,绝热渐变波导前端与后端的宽度 W_1 和 W_2 是两个关键参数,直接影响到模式转换效果。通过使用Lumerical中的有限差分本征模(Finite Difference Eigenmode, FDE)求解器分析波导中不同模式(TE_0 、 TM_0 和 TE_1 模式)在中心波长1550 nm处的有效折射率系数随波导宽度变换的情况,得到结果如图2所示。由图可知,当波导宽度小于0.68 μm 时, TM_0 模式的有效折射率高

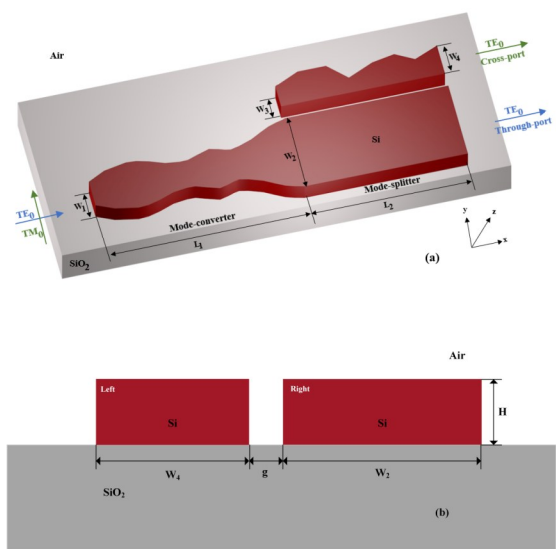


图 1 所设计的由模式转换器和模式分束器组成的 PSR (a) 三维结构图, (b) 侧视图
 Fig. 1 The PSR is composed of mode converter and mode beam splitter: (a) 3D view, (b) side view

于 TE_1 模式, 当波导宽度大于 $0.68 \mu\text{m}$ 时, TE_1 模式的有效折射率高于 TM_0 模式, TE_1 模式与 TM_0 模式在 $0.68 \mu\text{m}$ 波导宽度附近存在强烈的模式杂化。图中黑色虚线部分表示模式杂化区域, 在绝热渐变波导中此类模式杂化将会导致各模式之间发生模式转换, 即 TM_0 模式与 TE_1 模式会随着波导宽度的变化发生模式转换。

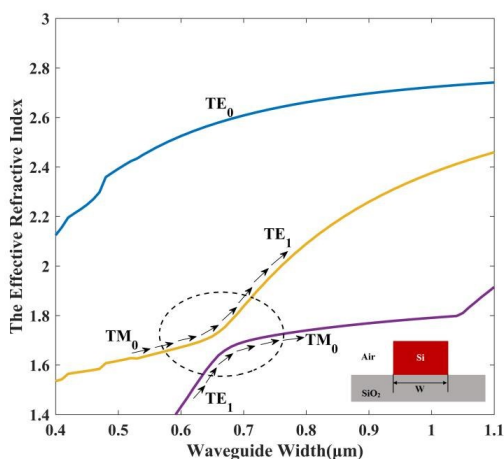


图 2 空气包层条形硅波导的有效折射率 (TE_0 、 TM_0 和 TE_1 模式) 随波导宽度变化图 (中心波长 1550 nm)
 Fig. 2 The effective refractive index (TE_0 、 TM_0 and TE_1 modes) of air-clad strip silicon waveguide versus waveguide width (central wavelength 1550 nm)

根据图 2 可知, TM_0 模式与 TE_1 模式之间的有效折射率差 $|n_{\text{eff-TM}_0} - n_{\text{eff-TE}_1}|$ 的最小值位于波导宽度为 $0.68 \mu\text{m}$ 处, 而入射宽度 W_1 与出射宽度 W_2 的取值应当位于 TM_0 模式与 TE_1 模式杂化区的两端, 避免波导两端横截面处出现混合模现象。传统片上光子器件的设计、优化过程通常需要人为手动调整各个参数, 并逐一计算相应性能以确定最终结构, 繁冗耗时。而采用 PSO 算法只需设置结构参数的变化范围, 并赋予优化函数即可自动寻找最优结构参数。因此, 本次 TM_0 - TE_1 模式转换器的优化设计采用 PSO 算法, 整体优化迭代过程如图 3 所示。

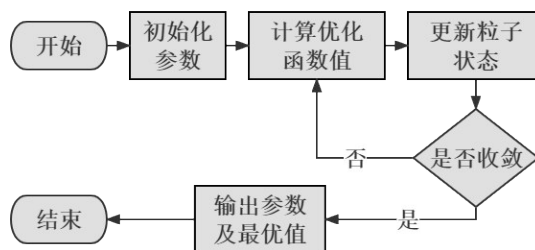


图 3 PSO 优化流程图
 Fig. 3 Flow diagram of PSO optimization

具体优化步骤如下所示:

第一步: 初始化待优化器件的结构参数, 包括 W_1 、 W_2 以及宽度变化范围; 初始化个体粒子数以及迭代次数, 设置 PSO 优化函数 FOM。

第二步: 计算当前个体粒子数、粒子状态以及结构参数的 FOM 值。

第三步: 粒子将依据局部最优解和全局最优解来更新自身粒子状态, 包括个体粒子的速度以及位置。

第四步: 判断此时是否满足收敛条件, 本次收敛条件设置为指定的迭代次数。如果收敛, 继续下一步; 如果未收敛, 返回第二步, 重新计算 FOM 值。

第五步: 达到收敛条件后, 输出结构参数值以及 FOM 值。

TM_0 - TE_1 模式转换器一般选择线性锥型结构, 只需确定好入射波导和出射波导的宽度。由上文分析可知, 在进行 PSO 优化前, 我们选取器件参数为 $W_1=0.4 \mu\text{m}$, $W_2=0.85 \mu\text{m}$, 此时实现模式转换需要接近 $100 \mu\text{m}$ 的长度。采用 PSO 优化时, 对线性锥波导进行分段处理, 以减少器件长度, 初始化将锥波导等分为 9 段, 每段宽度的变化范围位于 0.4 至

1.5 μm 之间。定义 $FOM = -10\log_{10}(P_{TM_0-TE_1})$ 作为 PSO 的优化函数,其中, $P_{TM_0-TE_1}$ 代表 TM_0-TE_1 模式转换效率, FOM 随着 $P_{TM_0-TE_1}$ 的逐渐增大而减小。初始选择个体粒子数的步进值为 10,通过依次增加粒子数数目,寻找最大模式转换效率,发现粒子数小于 40 时无法实现模式转换,因此设置个体粒子数为 40。经过多次迭代进行优化后, FOM 指标没有更进一步改进,整体迭代优化过程是在 Core i5-8400 六核处理器环境下运行,40 次迭代耗时约 50 小时。若进一步采用增大迭代次数或个体粒子数的方式进行处理,会成倍增大仿真所需时间成本,且对计算机运算处理能力要求过高。样条插值可以对数据进行精细化处理,根据 PSO 寻找的最优解再利用样条插值对结构进行优化,以进一步提高性能。插值过程中,为了找出每段步长中心位置处的最优值,波导宽度以 0.01 μm 作为插值处的步进,插值一次便计算一次全局性能,如果 FOM 值减小,说明此处最优值有效,相反,则插值无效并舍弃。图 4(a)、(b)所示分别为 PSO 迭代 40 次优化后以及结合插值拟合后的结构俯视图,由此可以看出图 4(b)相比于图 4(a)的器件边缘轮廓更加平滑,这是因为插值后波导前后宽度变化更缓慢,能够进一步保证能量的绝热传输。表 1 和表 2 对应为采用单纯 PSO 优化(40 次迭代)后,以及 PSO 优化(40 次迭代)结合样条插值拟合后的 TM_0-TE_1 模式转换器结构参数。图 4(c)展示了迭代次数为 10、20、30、40 以及 40 次之后,利用样条插值拟合后得到的 TM_0-TE_1 模式转换效率随器件长度的变化图。由图可以看出,经 40 次迭代后的转换效率最高达到 94% (紫色曲线,对应插入损耗为 0.267 dB),若在 40 次迭代得到结果的基础上,再利用样条插值精细化,可达到 99.5% 以上的转换效率(绿色曲线,对应插入损耗 < 0.019 dB),最

终模式转换器长度 L_1 确定为 25 μm 。

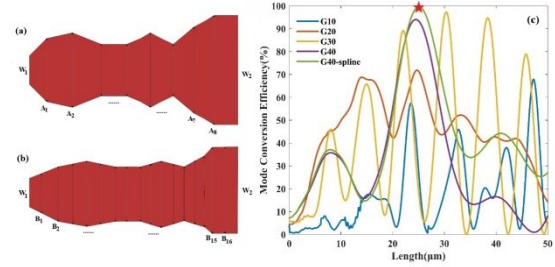


图 4 (a) PSO 优化后结构俯视图, (b) PSO 结合样条插值拟合后结构俯视图, (c) 不同迭代次数以及插值优化后的模式转换效率随器件长度的变化过程

Fig. 4 (a) Top view of PSO optimized structure, (b) top view of structure after PSO combined with spline interpolation fitting, (c) the variation of mode conversion efficiency with device length after different iteration times and interpolation optimization

图 5(a)所示为最优结构参数条件下, TE_0 和 TM_0 模式分别从输入端口入射时的模式转换效率随耦合长度的变化图,其中 TE_0 模式始终保持接近 100% 的能量传输,这是由于该结构对 TE_0 模式的传输不敏感,而 TM_0 模式通过模式杂化区域后转换为 TE_1 模式。插图为不同耦合长度处对应的 TE_0 和 TM_0 模式的模场分布,可以看出,在光束传播过程中, TE_0 模式几乎保持不变,沿波导 Through 端传输,而 TM_0 模式逐步转换为 TE_1 模式。图 5(b)为本文设计结构与文献结果的对比图,可以看出,所设计的 TM_0-TE_1 模式转换器相对已有结构实现了最低的插入损耗,同时,器件长度小于大部分器件。

2.2 模式分束器

将 TM_0 模式转换为 TE_1 模式后,仍需将 TE_1 模式分离并转换为 TE_0 模式输出。为了缩短 PSR 的总长度并提高器件的集成度,模式分束器部分采用 ADC

表 1 PSO 优化后 TM_0-TE_1 模式转换器结构参数

Table 1 Structure parameters of TM_0-TE_1 mode converter optimized by PSO

| Geometric parameters | W_1 | A_1 | A_2 | A_3 | A_4 | A_5 | A_6 | A_7 | A_8 | W_2 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Width/ μm | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 0.6 | 0.6 | 0.7 | 0.6 | 0.7 | 0.9 | 0.9 |

表 2 样条插值拟合后 TM_0-TE_1 模式转换器结构参数

Table 2 Structure parameters of TM_0-TE_1 mode converter optimized by spline interpolation fitting

| Geometric parameters | W_1 | B_1 | B_2 | B_3 | B_4 | B_5 | B_6 | B_7 | B_8 |
|----------------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Width/ μm | 0.4 | 0.6 | 0.65 | 0.68 | 0.65 | 0.6 | 0.59 | 0.6 | 0.65 |
| Geometric parameters | B_9 | B_{10} | B_{11} | B_{12} | B_{13} | B_{14} | B_{15} | B_{16} | W_2 |
| Width/ μm | 0.68 | 0.65 | 0.6 | 0.64 | 0.7 | 0.8 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |

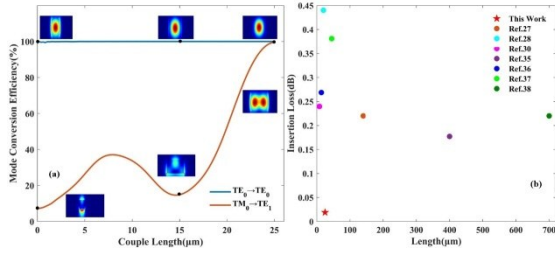


图5 (a)最优参数下模式转换效率和模场分布随器件长度变化过程,(b)与其他模式转换器相关文献进行对比

Fig. 5 (a) Variation of mode conversion efficiency and mode field distribution with device length under optimal parameters, (b) other mode converter related literature for comparison

结构来实现高阶模式(TE_1 模式)向低阶模式(TE_0 模式)的耦合。如图6(a)所示,模式分束器由左、右两根波导组成,模式转换器输出信号沿着右波导传输,固定右波导的出射宽度 $W_2=0.85\ \mu\text{m}$ (由前端模式转换器决定),为提高模式耦合效率,仍采用PSO算法对左波导结构进行优化设计,两根波导之间的间隔 $g=100\ \text{nm}$ 。对左波导结构参数进行初始化操作,设置入射宽度 $W_3=0.35\ \mu\text{m}$,出射宽度 $W_4=0.45\ \mu\text{m}$,并将初始结构等分为7段,每段宽度的变化范围位于 0.35 至 $0.45\ \mu\text{m}$ 之间。定义 $FOM = -10\log_{10}(P_{TE_1-TE_0})$ 作为PSO的优化函数,其中, $P_{TE_1-TE_0}$ 代表 TE_1-TE_0 模式耦合效率, FOM 随着 $P_{TE_1-TE_0}$ 的逐渐增大而减小。当确定个体粒子数为20时,两根波导模式耦合效果明显。经过15次迭代优化后 FOM 值收敛,在最大迭代次数为40时(耗时约20小时), FOM 减小至0.0277,最终实现了99.3%的模式耦合效率,已达到PSR性能要求,此时模式分束器长度 L_2 确定为 $20\ \mu\text{m}$,表3列出了PSO优化后模式分束器的左波导结构参数。图6(a)所示为PSO优化后的器件结构俯视图,图6(b)所示为 FOM 随迭代次数增加的变化图,插图显示了最大迭代次数时,模式耦合效率随器件长度的变化图。

表3 PSO优化后模式分束器左波导结构参数

Table 3 Left waveguide structural parameters of mode beam splitter optimized by PSO

| Geometric parameters | W_3 | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 | C_6 | W_4 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Width/ μm | 0.37 | 0.45 | 0.45 | 0.32 | 0.38 | 0.42 | 0.37 | 0.45 |

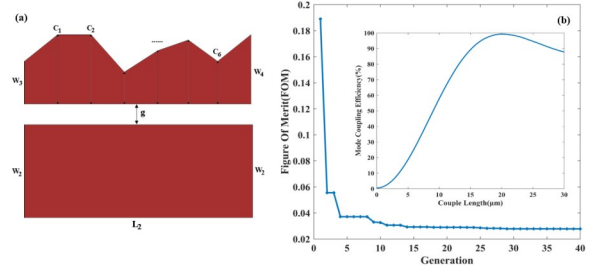


图6 (a)PSO优化后结构俯视图,(b) FOM 随迭代次数的变化过程,插图为40次迭代时的模式耦合效率随耦合长度变化过程

Fig. 6 (a) Top view of PSO optimized structure, (b) the variation process of FOM with the number of iterations, the inset shows the variation process of mode coupling efficiency with the coupling length at 40 iterations

3 性能与公差分析

随后,采用FDTD对设计的PSR特性进行分析,仿真中设定入射波长为 $1550\ \text{nm}$,网格精度设置为 $dx=5\ \text{nm}$, $dy=5\ \text{nm}$, $dz=5\ \text{nm}$ 。图7(a)和(b)分别是该PSR在最优结构参数下,输入 TE_0 与 TM_0 模式时沿传播方向的模场分布。由图可知,当注入 TE_0 模式时,由于相位失配, TE_0 模式不能与相邻的左波导发生耦合,因此将沿PSR的Through端输出。而当注入 TM_0 模式时,经过模式转换、分束后从PSR的Cross端以 TE_0 模式输出。可见,该PSR实现了 TE_0 和 TM_0 模式的分离,同时 TM_0 模式也被转换为Cross端的 TE_0 模式。

衡量PSR性能优劣的主要参数包括:插入损耗(Insertion Loss, IL)、串扰(Crosstalk, CT)和偏振消光比(Polarization Extinction Ratio, PER)。对于输入 TE_0 模式时,各参数计算公式为^[39]:

$$IL_{TE_0} = -10\log_{10}(P_{TE_0}^{\text{through}}) \quad (5)$$

$$CT_{TE_0} = 10\log_{10}(P_{TE_0}^{\text{cross}}/P_{TE_0}^{\text{through}}) \quad (6)$$

$$PER_{TE_0} = -10\log_{10}(P_{TM_0}^{\text{through}}/P_{TE_0}^{\text{through}}) \quad (7)$$

对于输入 TM_0 模式时,各参数计算公式为^[39]:

$$IL_{TM_0} = -10\log_{10}(P_{TE_0}^{\text{cross}}) \quad (8)$$

$$CT_{TM_0} = 10\log_{10}(P_{TE_0}^{\text{through}}/P_{TE_0}^{\text{cross}}) \quad (9)$$

$$PER_{TM_0} = -10\log_{10}(P_{TM_0}^{\text{cross}}/P_{TE_0}^{\text{cross}}) \quad (10)$$

针对所设计的PSR,使用FDTD方法对各端口模式的光功率进行数值分析,图7(c)和(d)中分别展示了当分别注入 TE_0 和 TM_0 模式时,该PSR在 $1500\sim 1600\ \text{nm}$ 波长范围内的性能参数。从图7(c)中可以看出,当输入 TE_0 模式时,在 $1500\sim 1600\ \text{nm}$ 波

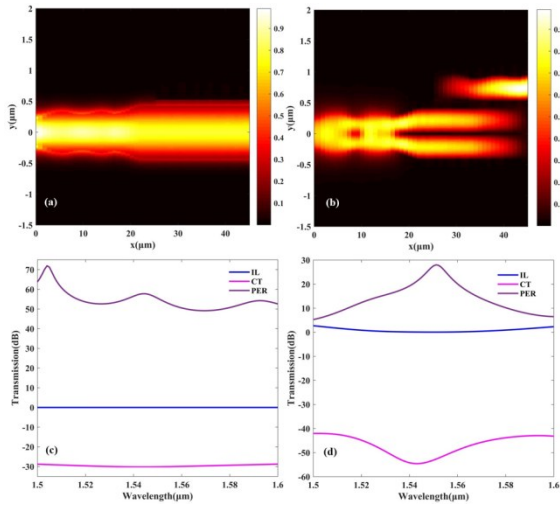


图7 模场传输分布:(a)TE₀模式入射时,(b)TM₀模式入射时,IL、CT和PER随波长变化图:(c)TE₀模式入射时,(d)TM₀模式入射时

Fig. 7 Mode profile transmission distribution: (a) TE₀ mode incident, (b) TE₀ mode incident, plot of IL, CT, and PER with wavelength: (c) TE₀ mode incident, (d) TM₀ mode incident

段内插入损耗均小于0.007 dB,串扰低于-28.7 dB,偏振消光比大于49.1 dB。TE₀模式的高效传输是由于在Through端未发生模式转换,该过程类似于直波导传输,因此损耗较低。从图7(d)中可以看出,当输入TM₀模式时,在整个C波段内插入损耗均小于0.34 dB,串扰低于-47.1 dB,偏振消光比大于15.5 dB,且在中心波长处插入损耗值为0.06 dB。表4将本文设计与先前报道的几种模式演变型PSR进行了性能比较,结果表明,在C波段,器件长度缩短了一个数量级,并且插入损耗和串扰达到最低,因此,所设计的PSR在1550 nm通信波长处,对于输

入不同偏振光束实现了低插入损耗、低串扰以及高偏振消光比的偏振分束旋转。

最后,对所设计的PSR进行公差分析,结合当前5 nm CMOS工艺精度^[40]以及标准193 nm光刻的线宽不均匀性通常小于1%^[41],不同宽度的制造误差设置为±10 nm(最大结构参数的1%)。考虑到TE₀模式入射时,光束始终在Through端进行传输,并且不发生模式转换与模式耦合,损耗极低,因此本文只针对TM₀模式入射时进行公差分析,得到结果如图8所示。图8(a)和(b)为波导间隔 $\Delta g = \pm 10$ nm情况下,各端口输出TE₀和TM₀模式的归一化透射谱,结果表明:该参数误差下的IL<0.52 dB,CT<-46 dB,PER>15.2 dB;图8(c)和(d)为右波导入射宽度 $\Delta w_1 = \pm 10$ nm情况下,各端口输出TE₀和TM₀模式的归一化透射谱,结果表明:该参数误差下的IL<0.35 dB,CT<-47.1 dB,PER>15.4 dB;图8(e)和(f)为右波导出射宽度 $\Delta w_2 = \pm 10$ nm情况下,各端口输出TE₀和TM₀模式的归一化透射谱,结果表明:该参数误差下的IL<1.25 dB,CT<-44.3 dB,PER>13.3 dB;图8(g)和(h)为左波导入射宽度 $\Delta w_3 = \pm 10$ nm情况下,各端口输出TE₀和TM₀模式的归一化透射谱,结果表明:该参数误差下的IL<0.34 dB,CT<-47.1 dB,PER>15.4 dB;图8(i)和(j)为左波导出射宽度 $\Delta w_4 = \pm 10$ nm情况下,各端口输出TE₀和TM₀模式的归一化透射谱,结果表明:该参数误差下的IL<0.34 dB,CT<-46.9 dB,PER>15.6 dB。表5所示各结构参数进行公差分析后的性能结果,由此可知,在一定范围内,其参数偏离最优值只对器件的插入损耗影响较大,而串扰以及偏振消光比几乎不受影响。

表4 模式演变型PSR性能比较

Table 4 Performance comparison of mode evolution PSR

| Structures | IL/dB | PER/dB | CT/dB | Length/ μm | Bandwidth/nm | Results |
|---------------------------------|--------------|--------|--------|-----------------------|--------------|---------|
| Taper+ADC ^[25] | - | >10 | - | 71 | 70 | Sim. |
| Ridge+ADC ^[27] | <0.5 | - | <-50 | 130 | 200 | Sim. |
| Ridge+ADC+MMI ^[29] | ~1.5 | >17 | - | 3000 | 35 | Exp. |
| Taper+MMI ^[30] | <2.5 | - | <-12 | 153.7 | 100 | Exp. |
| Ridge+Y branch ^[31] | <0.4 | >12 | - | 95 | 400 | Sim. |
| Taper+Y branch ^[32] | <1 | - | <-14 | 272 | 100 | Exp. |
| Taper+SWG ^[34] | 0.5(1550 nm) | - | <-19 | 151 | 74 | Sim. |
| Ridge+Y branch ^[35] | <6 | >10 | - | 800 | 35 | Exp. |
| ADC+Ridge+Taper ^[36] | <0.9 | - | <-20 | 62.8 | 60 | Exp. |
| This Work | <0.34 | >15.5 | <-47.1 | 45 | 35 | Sim. |

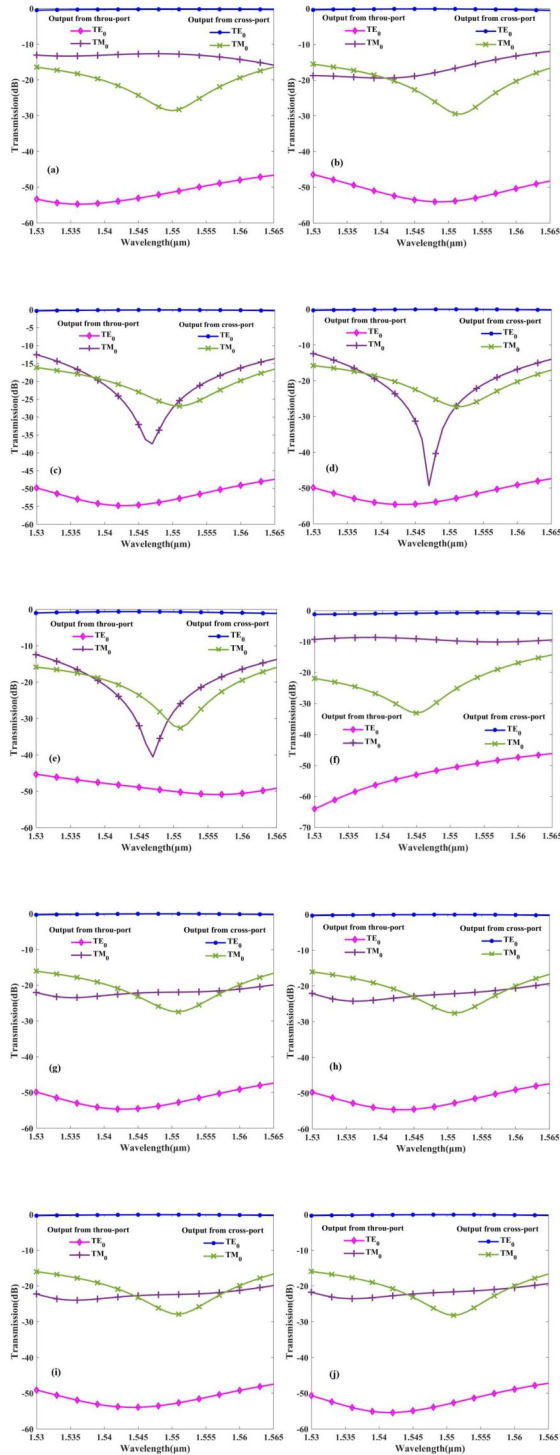


图8 公差分析: (a) $\Delta g=+10$ nm, (b) $\Delta g=-10$ nm, (c) $\Delta w_1=+10$ nm, (d) $\Delta w_1=-10$ nm, (e) $\Delta w_2=+10$ nm, (f) $\Delta w_2=-10$ nm, (g) $\Delta w_3=+10$ nm, (h) $\Delta w_3=-10$ nm, (i) $\Delta w_4=+10$ nm, (j) $\Delta w_4=-10$ nm

Fig. 8 Tolerance analysis: (a) $\Delta g=+10$ nm, (b) $\Delta g=-10$ nm, (c) $\Delta w_1=+10$ nm, (d) $\Delta w_1=-10$ nm, (e) $\Delta w_2=+10$ nm, (f) $\Delta w_2=-10$ nm, (g) $\Delta w_3=+10$ nm, (h) $\Delta w_3=-10$ nm, (i) $\Delta w_4=+10$ nm, (j) $\Delta w_4=-10$ nm

表5 结构参数公差分析

Table 5 Tolerance analysis of structural parameters

| Structural parameters | IL/dB | CT/dB | PER/dB |
|-----------------------|-------|--------|--------|
| $g \pm 10$ nm | <0.52 | <-46 | >15.2 |
| $w_1 \pm 10$ nm | <0.35 | <-47.1 | >15.4 |
| $w_2 \pm 10$ nm | <1.25 | <-44.3 | >13.3 |
| $w_3 \pm 10$ nm | <0.34 | <-47.1 | >15.4 |
| $w_4 \pm 10$ nm | <0.34 | <-46.9 | >15.6 |
| 最优参数 | <0.34 | <-47.1 | >15.5 |

4 结论

本文设计了一种基于模式演变原理的低损耗、低串扰以及高偏振消光比的PSR,器件由锥型 TM_0 -TE,模式转换器与非对称定向耦合结构的模式分束器组成。利用PSO算法结合样条插值原理对器件结构参数进行了优化,通过FDTD对器件性能进行仿真,结果表明:该PSR高效地实现了偏振分束旋转的功能,在整个C波段内插入损耗均小于0.34 dB,串扰低于-47.1 dB,偏振消光比大于15.5 dB,且在1.550 nm中心波长处插入损耗值为0.06 dB。此外,对器件制作公差进行了分析,表明结构参数在 $\Delta g=\pm 10$ nm、 $\Delta w_1=\pm 10$ nm、 $\Delta w_2=\pm 10$ nm、 $\Delta w_3=\pm 10$ nm、 $\Delta w_4=\pm 10$ nm变化幅度内,在整个C波段,串扰以及偏振消光比几乎不受影响。相比同类型实现原理的PSR,本文所设计的结构具有小尺寸、低损耗、低串扰以及高偏振消光比等特性,未来可以应用于波分复用、偏振复用以及大规模片上光子集成回路等领域。

References

- [1] SOREF R. The Past, Present, and Future of Silicon Photonics [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, **12**(6): 1678-1687.
- [2] STOJANOVIC V, RAM R, POPOVIC M, *et al.* Monolithic silicon-photonics platforms in state-of-the-art CMOS SOI processes [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(10): 13106.
- [3] MANOLATOU C, JOHNSON S, FAN S, *et al.* High-Density Integrated Optics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, **17**(9): 1682-1692.
- [4] BARWICZ T, WATTS M R, POPOVI, *et al.* Polarization-transparent microphotonic devices in the strong confinement limit [J]. *Nature Photonics*, 2006, **1**(1): 57-60.
- [5] HE J, JIAO L, CUI H, *et al.* A polarization-independent terahertz modulator based on metamaterials with symmetric structure; proceedings of the Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies III, F, 2014 [C]. Beijing, 2014.
- [6] ABDELSALAM M, SWILLAM M, MAHMOUD A. Polarization-independent dielectric metasurface for mid-infra-

- red applications; proceedings of the High Contrast Meta-structures VII, F, 2018 [C]. San Francisco, 2018.
- [7] CONRADI H, DE FELIPE D, KLEINERT M, *et al.* Hybrid integration of a polarization independent optical circulator; proceedings of the Proc SPIE, F, 2020 [C]. San Francisco, 2020.
- [8] FUKUDA H, YAMADA K, TSUCHIZAWA T, *et al.* Ultrasmall polarization splitter based on silicon wire waveguides [J]. *Optics Express*, 2007, **14**(25): 12401–12408.
- [9] FUKUDA H, YAMADA K, TSUCHIZAWA T, *et al.* Silicon photonic circuit with polarization diversity [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(7): 4872–4880.
- [10] GAO L, HUO Y, HARRIS J S, *et al.* Ultra-Compact and Low-Loss Polarization Rotator Based on Asymmetric Hybrid Plasmonic Waveguide [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(21): 2081–2084.
- [11] LIU L, DING Y, YVIND K, *et al.* Silicon-on-insulator polarization splitting and rotating device for polarization diversity circuits [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(13): 12646–12651.
- [12] ZHAO Y, QIU C, WU A, *et al.* Broadband Polarization Splitter-Rotator and the Application in WDM Receiver [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, **11**(1): 1–10.
- [13] DONG P, XIE C, CHEN L, *et al.* 112-Gb/s monolithic PDM-QPSK modulator in silicon [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(26): B624–629.
- [14] JI H, ZHOU X, SUN C, *et al.* Polarization-diversity receiver using remotely delivered local oscillator without optical polarization control [J]. *Optics Express*, 2020, **28**(15): 22882–22890.
- [15] ZHANG L, YANG S, ZHANG G, *et al.* Broadband 2×2 Polarization Splitter-Rotator Based on an Adiabatic Asymmetric Directional Coupler on the Lithium-Niobate-on-Insulator; proceedings of the Asia Communications and Photonics Conference, F, 2020 [C]. Beijing, 2020.
- [16] SOCCI L, SORIANELLO V, ROMAGNOLI M. 300 nm bandwidth adiabatic SOI polarization splitter-rotators exploiting continuous symmetry breaking [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(15): 19261–19271.
- [17] YU K, WANG L, WU W, *et al.* Demonstration of an on-chip broadband polarization splitter and rotator using counter-tapered coupler [J]. *Optics Communications*, 2019, **431**(15): 58–62.
- [18] GUAN H, NOVACK A, STRESHINSKY M, *et al.* CMOS-compatible highly efficient polarization splitter and rotator based on a double-etched directional coupler [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(3): 2489–2496.
- [19] TU X, LI M, XING J, *et al.* Compact Polarization Splitter-Rotator Based on an Asymmetric Bi-level Lateral Taper in an Adiabatic Directional Coupler [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **34**(3): 1–1.
- [20] XIE C, ZOU X, LI P, *et al.* Ultracompact silicon polarization splitter-rotator using a dual-etched and tapered coupler [J]. *Applied Optics*, 2020, **59**(30): 9540–9547.
- [21] XIONG Y, WANGüEMERT-PéREZ J, XU D, *et al.* Polarization splitter and rotator with subwavelength grating for enhanced fabrication tolerance [J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(24): 6931–6934.
- [22] XIE C, ZOU X, ZOU F, *et al.* High-performance ultra-compact polarization splitter-rotators based on dual-etching and tapered asymmetrical directional coupler [J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, **19**(12): 121301.
- [23] TAN K, HUANG Y, LO G-Q, *et al.* Compact highly-efficient polarization splitter and rotator based on 90° bends [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(13): 14506–14512.
- [24] JIANG W. Fabrication-Tolerant Polarization Splitter and Rotator Based on Slanted Silicon Waveguides [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, **30**(7): 1–1.
- [25] DAI D, BOWERS J. Novel concept for ultracompact polarization splitter-rotator based on silicon nanowires [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(11): 10940–10949.
- [26] GUAN H, NOVACK A, STRESHINSKY M, *et al.* High-Efficiency Low-Crosstalk 1310-nm Polarization Splitter and Rotator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(9): 925–928.
- [27] GUO D, CHU T. Broadband and low-crosstalk polarization splitter-rotator with optimized tapers [J]. *OSA Continuum*, 2018, **1**(3): 841–850.
- [28] ZHANG B, LI Y, QIANG F, *et al.* Switchable Polarization Beam Splitter Based on GST-on-Silicon Waveguides [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, **12**(2): 1–1.
- [29] DAI X, LU Q, GUO W. Fabrication-Tolerant Polarization Rotator-Splitter based on Silicon Nitride Platform; proceedings of the Optical Fiber Communication Conference, F, 2021 [C]. Washington, 2021.
- [30] DING Y, OU H, PEUCHERET C. Wideband polarization splitter and rotator with large fabrication tolerance and simple fabrication process [J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(8): 1227–1229.
- [31] WANG J, NIU B, SHENG Z, *et al.* Novel ultra-broadband polarization splitter-rotator based on mode-evolution tapers and a mode-sorting asymmetric Y-junction [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(11): 13565–13571.
- [32] SUN C, CHEN G, ZHANG X. A Low Crosstalk and Broadband Polarization Rotator and Splitter Based on Adiabatic Couplers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(20): 1–1.
- [33] KEYVANINIA S, BOERMA H, WöSSNER M, *et al.* Highly efficient passive InP polarization rotator-splitter [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(18): 25872–25881.
- [34] MA M, PARK A, WANG Y, *et al.* Sub-wavelength grating-assisted polarization splitter-rotators for silicon-on-insulator platforms [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(13): 17581–17591.
- [35] PERESTJUK M, BOERMA H, SCHINDLER A, *et al.* Inverse-Designed InP-Based Polarization Rotator-Splitter; proceedings of the Optical Fiber Communication Conference, F, 2021 [C]. Washington, 2021.
- [36] BUSTAMANTE Y, FARIAS G, ANDRADE H, *et al.* Demonstration of a Silicon Polarization Splitter and Rotator based on a Bow-tie Structure [J]. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 2021, **45**(10): 100921.
- [37] DENG C, LU M, HUANG L, *et al.* Reconfigurable and low-power consumption polarization rotating beam splitter with EIT-like effect based on SOI ridge waveguide [J]. *Optics Communications*, 2021, **495**: 127054.
- [38] ITO M, FUKUI T, TANEMURA T, *et al.* Compact sym-

- metric polarization rotator-splitter on InP [J]. *Optics Express*, 2022, **30**(3): 4179-4188.
- [39] LIU Y, WANG S, WANG Y, *et al.* Subwavelength polarization splitter - rotator with ultra-compact footprint [J]. *Optics Letters*, 2019, **44**(18): 4495-4498.
- [40] QIN L, HUANG Y, XIA F, *et al.* 5 nm Nanogap Electrodes and Arrays by a Super-resolution Laser Lithography [J]. *Nano Letters*, 2020, **20**(7): 4916-4923.
- [41] SELVARAJA S K, BOGAERTS W, DUMON P, *et al.* Subnanometer Linewidth Uniformity in Silicon Nanophotonic Waveguide Devices Using CMOS Fabrication Technology [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2010, **16**(1): 316-324.