

50 dB 消光比的二氧化硅包层偏振旋转器和偏振转换分束器*

马汉斯^{1)†} 林振¹⁾ 胡丁祺¹⁾ 罗依茜¹⁾ 邝应乐¹⁾ 张婷¹⁾
夏浩林¹⁾ 童永东¹⁾ 曹翊¹⁾ 高慧琴²⁾ 龚尹励¹⁾
甘龙飞¹⁾ 赵娜¹⁾ 杨俊波^{2)‡} 吴加贵^{3)‡‡}

1) (湖南工商大学微电子与物理学院, 长沙 410205)

2) (国防科技大学理学院, 长沙 410073)

3) (西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2026 年 1 月 19 日收到; 2026 年 3 月 14 日收到修改稿)

绝缘体上硅 (silicon on insulator, SOI) 材料平台具有高折射率差的特性, 这使得硅基光子器件面临较强的偏振相关性问题. 为了兼顾小尺寸和高消光比 (extinction ratio, ER) 特性, 本文提出了尺寸仅为 $29\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ 的 50 dB ER 偏振旋转器 (polarization rotator, PR) 和偏振转换分束器 (polarization splitter-rotator, PSR). PR 和 PSR 的设计基于双层锥形波导的模式演化理论, 进一步利用逆向设计算法对其性能进行优化. PR 的仿真结果表明, 在 1550 nm 波长处, 对于 $\text{TM}_0\text{-TE}_0$ 模式转换, 其插入损耗 (insertion loss, IL) 和 ER 分别约为 0.2 dB 和 79.8 dB, TE_0 和 TM_0 的反射损耗 (reflection loss, RL) 分别约为 41.5 dB 和 50 dB; PSR 的仿真结果表明, 在 1550 nm 波长处, 对于 $\text{TE}_0\text{-TE}_0$ 模式转换, 其 IL 和 ER 分别约为 0.4 dB 和 53.7 dB, TE_0 和 TM_0 的 RL 分别约为 22.5 dB 和 32.6 dB, 而对于 $\text{TM}_0\text{-TE}_0$ 模式转换, 其 IL 和 ER 分别约为 0.3 dB 和 52.7 dB, TE_0 和 TM_0 的 RL 分别约为 33.3 dB 和 26.3 dB. 此外, PR 和 PSR 设计在具有二氧化硅包层的 SOI 平台上, 与采用二氧化硅包层的硅基光子器件具有良好的集成兼容性.

关键词: 50 dB 消光比, 偏振旋转器, 偏振转换分束器, 二氧化硅包层

DOI: 10.7498/aps.75.20260095

CSTR: 32037.14.aps.75.20260095

1 引言

绝缘体上硅 (silicon on insulator, SOI) 因其高折射率差以及与互补金属氧化物半导体技术的兼容性, 逐渐成为光子集成电路的常用平台, 硅基

光互连技术也广泛应用于人工智能、物联网和机器学习等前沿领域^[1-4]. SOI 平台的高折射率差特性, 在显著提升光子芯片集成度的同时, 也引发了较为严重的双折射效应. 正因如此, 偏振敏感性成为大多数硅基光子器件发展过程中的一大关键挑战.

偏振分集方案常被用于处理光子器件所面临

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFF0706005)、国家自然科学基金 (批准号: 62305387, 12305268, 12075014)、国防科技大学基金 (批准号: ZK23-03)、湖南省自然科学基金 (批准号: 2023JJ40683, 2023JJ40223, 2024JJ6184, 2023JJ30195)、湖南省教育厅科研基金 (批准号: 24B0575, 22B0655, 22A0435) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mahansi2024@163.com

‡ 通信作者. E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn

‡‡ 通信作者. E-mail: mgh@swu.edu.cn

的偏振态问题^[5]. 其中, 偏振旋转器 (polarization rotators, PRs) 和偏振转换分束器 (polarization splitter-rotators, PSRs) 作为偏振分集电路中的核心元件, 发挥着关键作用. 为了实现基于 220 nm 厚硅波导的 PR 和 PSR, 需借助非对称包层材料以及非对称芯波导来引入特定的非对称结构. 通过引入非对称包层材料, 例如空气和氮化硅^[6-8], 可将横向电场 (transverse electric, TE) 偏振态的光转换为横向磁场 (transverse magnetic, TM) 偏振态. 然而, 这些材料的引入不仅增加了制造工艺的复杂程度, 还限制了其与二氧化硅包层光子器件的集成能力. 在具备上下二氧化硅包层的硅波导中, 若要实现正交偏振态之间的转换, 则需采用非对称芯波导结构^[9-11]. 脊形波导便是典型的非对称结构之一. Liu 等^[12]设计了一种长度为 100 μm 的 PR, 该设计通过采用非对称脊形锥形波导, 打破波导的垂直对称性, 进而将 TM_0 模式转换为 TE_1 模式. 不过, 由于这种传统结构依赖于绝热模式演化, 其所需长度往往较长. 近期, 凭借在纳米尺度下对折射率的灵活调控能力, 逆向设计方法为优化紧凑型 PR 和 PSR 开辟了一条行之有效的路径^[13-15]. Qiao 等^[16]运用直接二进制搜索 (direct binary search, DBS) 算法, 对一种基于浅刻蚀非对称波导的 PSR 进行了优化. 该器件尺寸仅为 $10.8 \mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$, 在 1500—1600 nm 带宽范围内, 其插入损耗 (insertion loss, IL) 小于 0.8 dB, 仿真串扰 (crosstalk, CT) 小于 -17 dB. 逆向设计的结构具备超紧凑尺寸的优势, 然而, 消光比 (extinction ratios, ERs) 作为评估其性能的一项关键指标, 却严重制约了这类结构的潜在应用范围. 鉴于此, 在二氧化硅包层的 SOI 平台上, 设计具有小尺寸、低损耗、高 ER 特性的 PR 和 PSR, 依旧是当前亟待攻克的关键难题.

本文基于双层锥形波导的模式演化理论, 运用 DBS 算法优化了超紧凑型的 PR 和 PSR, 其 ERs 大于 50 dB. 与利用特定包层材料来打破波导垂直对称性的方法不同, 所提出的 PR 和 PSR 设计在顶层硅厚度为 220 nm, 上包层为二氧化硅的 SOI 平台上, 与传统的硅基光子器件具有出色的集成兼容性.

2 设计理论

PR 和 PSR 的三维示意图分别如图 1(a), (b)

所示, 二者均由偏振旋转单元和模式转换单元组成. 其中, PR 的功能是将输入的 TM_0 模式先转换为 TE_1 模式, 再转换为 TE_0 模式输出; 而 PSR 的功能是将输入的 TM_0 模式先转换为 TE_1 模式, 再转换为 TE_0 模式从一个端口输出, 同时将输入的 TE_0 模式保持不变, 从另一个端口输出.

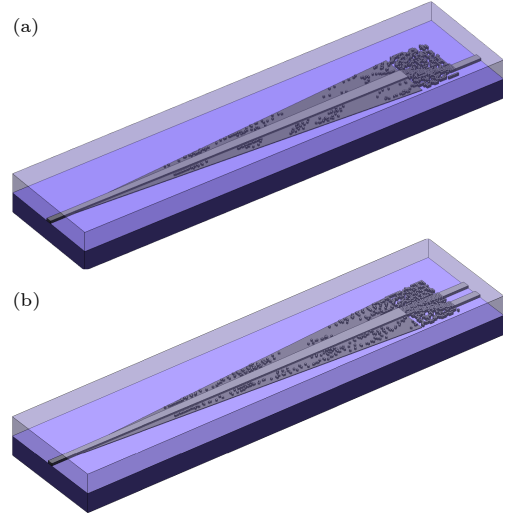


图 1 PR 和 PSR 的三维示意图 (a) PR; (b) PSR

Fig. 1. Three-dimensional schematics of the PR and PSR: (a) PR; (b) PSR.

偏振旋转单元是基于模式演化理论设计^[17,18]. 在双层锥形波导中, 随着脊部和肋部宽度持续增加, 波导会呈现垂直不对称特性, 波导内的模式特性愈发难以区分. 具体来说, 当 TM_0 模式沿着双层锥形波导传播时, 在波导达到特定宽度处, TM_0 模式与 TE_1 模式会发生杂化, 使得二者难以分辨. 因此, 通过选择合适的波导宽度, 能够实现 TM_0 和 TE_1 模式之间的偏振转换.

模式转换单元则基于非对称 Y 分支理论设计^[19,20]. 当 Y 形分支结构中主干与分支中的模式有效折射率非常接近时, 主干中的不同模式在传播过程中能够分别演化为分支中的基模^[21]. 模式转换的效果用模式转换因子 (mode conversion factor, MCF) 进行评估:

$$\text{MCF} = \frac{2|\beta_1 - \beta_2|}{\tan \theta \left[(\beta_1 - \beta_2)^2 - 2(n_0 k)^2 \right]^{1/2}}, \quad (1)$$

式中, β_1 和 β_2 分别是传播常数, θ 是发散角, n_0 是折射率, k_0 是自由空间波数. 因此, Y 形分支可将主干中的 TE_1 和 TE_0 模式分别转换为分支中的 TE_0 模式.

基于模式演化和 Y 分支理论, 能够完成传统 PR 和 PSR 的设计. 由于传统波导结构只能线性地累积相位, 通常需要较长的耦合或演化区域以满足绝热演化条件, 导致器件占用面积较大. 相比之下, 逆向设计的离散结构在波导内构建了复杂且非均匀的有效折射率场. 当光波经过时, 亚波长尺度的离散结构会产生强烈的局域散射, 从而打破线性累积相位的限制, 实现对局部相位、振幅和模式等光学特性的精确调控, 能够在极大缩小尺寸的同时提升性能. 因此, 本文先基于模式演化和 Y 分支理论, 预设 PR 和 PSR 的高质量初始结构, 随后利用 DBS 算法对局部区域进行离散化逆向设计, 最终实现超紧凑、高性能的器件.

3 结构优化

为达成器件小尺寸、高性能的目标, 采用 DBS 算法对 PR 和 PSR 进行逆向设计^[22]. 鉴于 DBS 算法对初始结构较为敏感, 且容易过早收敛, 因此基于双层锥形波导与 Y 结结构手动设置初始结构, 以确保优化过程的稳定性和有效性.

PR 和 PSR 的偏振旋转单元采用双层锥形波导进行设计. 如图 2(a) 所示, 浅灰色和深灰色区域分别代表双层锥形波导的脊部和肋部. 其中, 脊部厚度设定为 220 nm, 该尺寸符合传统硅基光子器件的标准规范; 肋部厚度为 70 nm, 旨在维持双层锥形波导的垂直不对称特性. 在波导宽度参数方面, 脊部的输入宽度选定为 0.4 μm , 输出宽度选定为 0.9 μm , 以分别有效支持 TM_0 模式和 TE_1 模式的传输. 为保持波导的垂直不对称性, 肋部的输出宽度需大于脊部的输出宽度. 为了与后续的模式转换单元实现合理连接, 肋部输出宽度最终确定为

4 μm . 这种垂直不对称结构, 使得沿波导传播的 TM_0 模式先演变为兼具 TM_0 和 TE_1 特征的杂化模式, 最终完全演变为 TE_1 模式. 此外, 输入的 TE_0 模式在通过该双层锥形波导时, 能够保持其原有的偏振态不变. 图 2(b) 呈现了 TM_0 模式和 TE_1 模式的偏振转换效率随锥形波导长度的变化关系. 综合考量器件的尺寸与性能表现, 锥形波导的长度选定为 26 μm . 在 1550 nm 波长处, TE_0 - TE_0 和 TM_0 - TE_1 模式转换的 IL 分别约为 0.04 dB 和 0.3 dB.

PR 和 PSR 的模式转换单元分别是 TE_1 - TE_0 模式转换器和双模解复用器. 其中, 二者的初始结构均基于 Y 分支理论进行设计, 最终结构则都是通过 DBS 算法优化得到. 具体而言, TE_1 - TE_0 模式转换器由 1 个 0.9 μm 宽的输入波导、1 个 3 μm \times 4 μm 的设计区域和 1 个 0.5 μm 宽输出波导组成; 而双模解复用器是由 1 个 0.9 μm 宽的输入波导、1 个 3 μm \times 4 μm 的设计区域和 2 个 0.5 μm 宽输出波导组成, 且输出波导之间的间隙宽度为 1 μm . 二者的设计区域被离散为 30 \times 40 个像素单元, 每个像素单元具备硅和二氧化硅两种状态, 且尺寸为 100 nm \times 100 nm, 深度为 220 nm. 根据优化目标, 在 DBS 算法中, TE_1 - TE_0 模式转换器的品质因子 (figure of merit, FOM) 函数定义为

$$\text{FOM} = |T_{\text{TE}_1\text{-TE}_0}|. \quad (2)$$

双模解复用器的 FOM 函数定义为

$$\text{FOM} = \alpha \times |T_{\text{TE}_0\text{-TE}_0}| + (1 - \alpha) \times |T_{\text{TE}_1\text{-TE}_0}|, \quad (3)$$

式中, $T_{i\text{-}j}$ 为当输入 i 模式时, j 模式在 1550 nm 波长的透射率; α 为权重因子. 图 3(a), (b) 分别展示了 TE_1 - TE_0 模式转换器和双模解复用器的初始结构、中间结构以及最终结构. TE_1 - TE_0 模式转

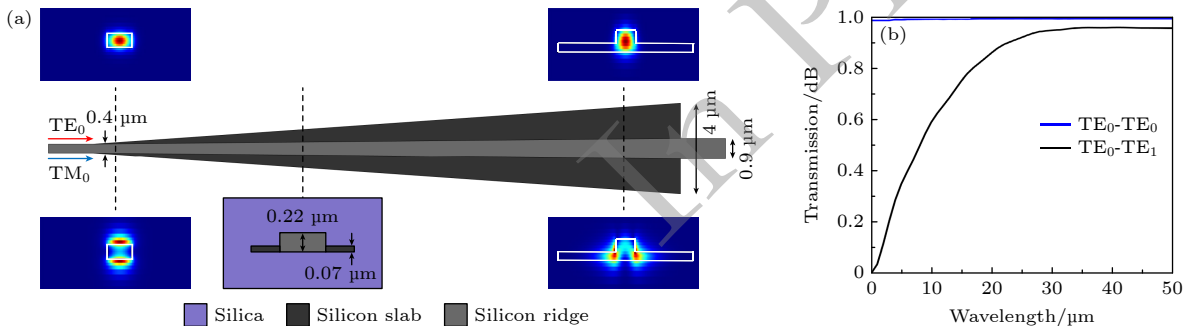


图 2 偏振转换单元的仿真结果 (a) 俯视图; (b) 性能随长度的变化

Fig. 2. Simulated results of the polarization-rotation section: (a) Top view; (b) performance variation with the taper length.

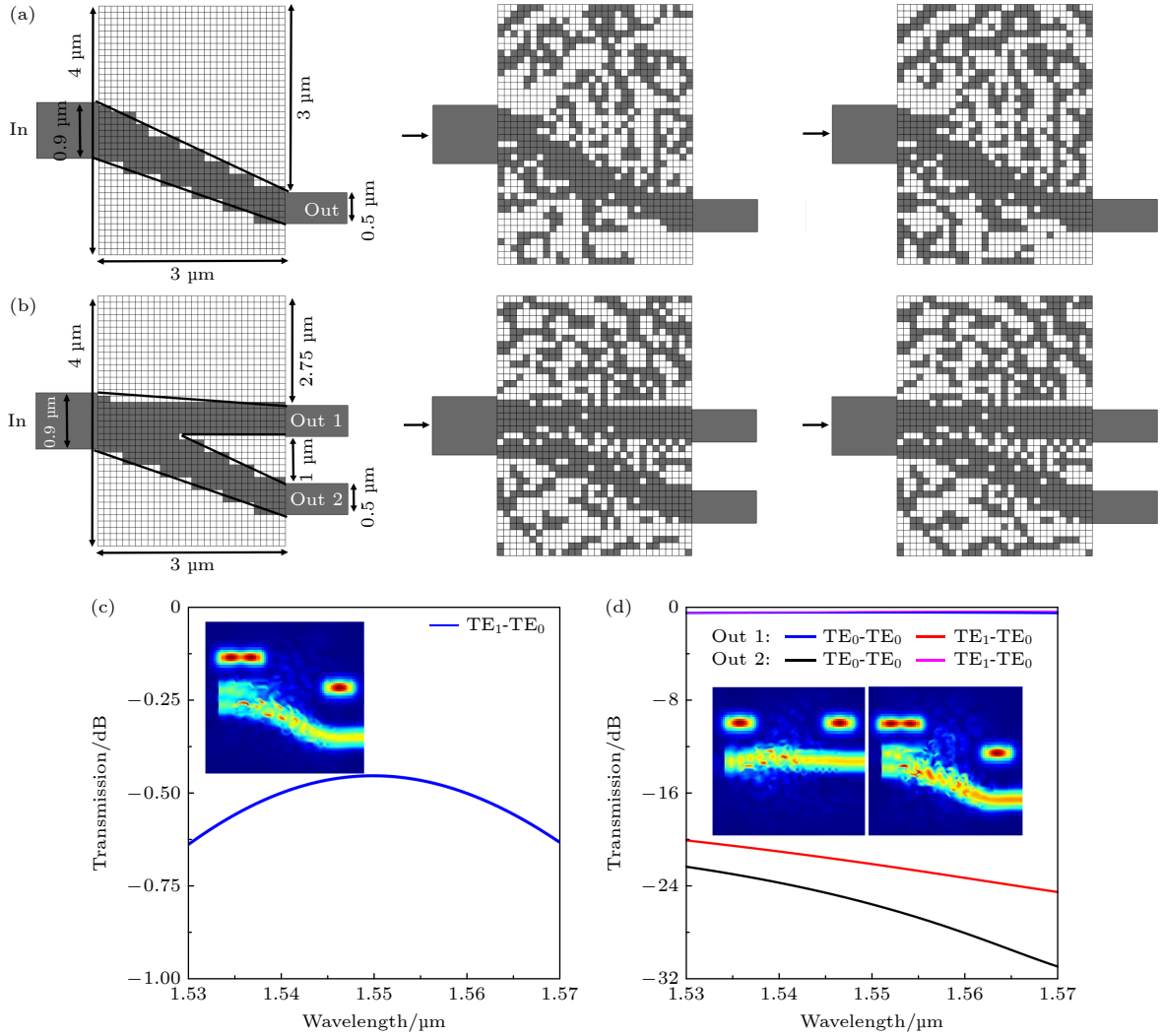


图3 模式转换单元的仿真结果 (a) PR模式转换单元的初始结构、中间结构和最终结构; (b) PSR模式转换单元的初始结构、中间结构和最终结构; (c) PR模式转换单元的透射光谱; (d) PSR模式转换单元的透射光谱

Fig. 3. Simulated results of the mode-conversion sections: (a) Initial, intermediate, and final structures of the PR mode-conversion section; (b) initial, intermediate, and final structures of the PSR mode-conversion section; (c) transmission spectra of the PR mode-conversion section; (d) transmission spectra of the PSR mode-conversion section.

换器和双模解复用器的模拟透射光谱, 分别如图3(c), (d)所示, 插图为相应通道中的光场分布情况. 在1550 nm波长处, TE_1 - TE_0 模式转换器的IL小于0.5 dB, 双模解复用器所有模式的ILs皆小于0.6 dB, CTs皆小于-22.3 dB.

通过将双层锥形波导、 TE_1 - TE_0 模式转换器以及双模解复用器相结合, 能够得到PR和PSR的高质量初始结构. 其中, PR的初始结构由双层锥形波导和 TE_1 - TE_0 模式转换器共同构成; 而PSR的初始结构由双层锥形波导和双模解复用器共同构成. 随后, 利用DBS算法对这一初始结构进行第2次的算法优化, 目的是进一步提升器件的性能. 根据优化目标, 在DBS算法中, PR的FOM

函数定义为

$$FOM = \alpha \times |T_{TM_0-TE_0}| - (1 - \alpha) \times |T_{TM_0-TM_0}|. \quad (4)$$

PSR的FOM函数定义为

$$FOM = \alpha \times (|T_{TE_0-TE_0}| + |T_{TM_0-TE_0}|) - (1 - \alpha) \times (|T_{TE_0-TM_0}| + |T_{TM_0-TM_0}|), \quad (5)$$

式中, $T_{i \rightarrow j}$ 为当输入*i*模式时, *j*模式在1550 nm波长的透射率; α 为权重因子. 值得注意的是, 优化区域被限定在图4中红色、蓝色和黑色实线框所圈定的范围内. 其中, 红色和蓝色实线框的边界与器件边界之间的距离均大于0.1 μm , 目的是确保满足最小的制造特征尺寸要求. 此外, 所指定的优化区域被离散为若干像素单元, 每个像素单元

具备硅和二氧化硅两种状态, 且尺寸为 $100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$, 深度为 220 nm . PR 和 PSR 的初始结构、中间结构和最终结构分别如图 4(a), (b) 所示.

PR 和 PSR 的模拟透射光谱分别如图 5(a), (b) 所示, 插图为相应通道中的光场分布情况. 对于输入 TE_0 模式, IL、ER 和反射损耗 (reflection loss, RL) 定义为

$$\text{IL}=10 \times \log_{10}(T_{\text{TE}_0-\text{TE}_0}), \quad (6)$$

$$\text{ER}=-10 \times \log_{10}(T_{\text{TE}_0-\text{TM}_0}/T_{\text{TE}_0-\text{TE}_0}), \quad (7)$$

$$\text{RL}=10 \times \log_{10}(R_{\text{TE}_0}). \quad (8)$$

对于输入 TM_0 模式, IL, ER 和 RL 定义为

$$\text{IL}=10 \times \log_{10}(T_{\text{TM}_0-\text{TE}_0}), \quad (9)$$

$$\text{ER}=-10 \times \log_{10}(T_{\text{TM}_0-\text{TM}_0}/T_{\text{TM}_0-\text{TE}_0}), \quad (10)$$

$$\text{RL}=10 \times \log_{10}(R_{\text{TM}_0}). \quad (11)$$

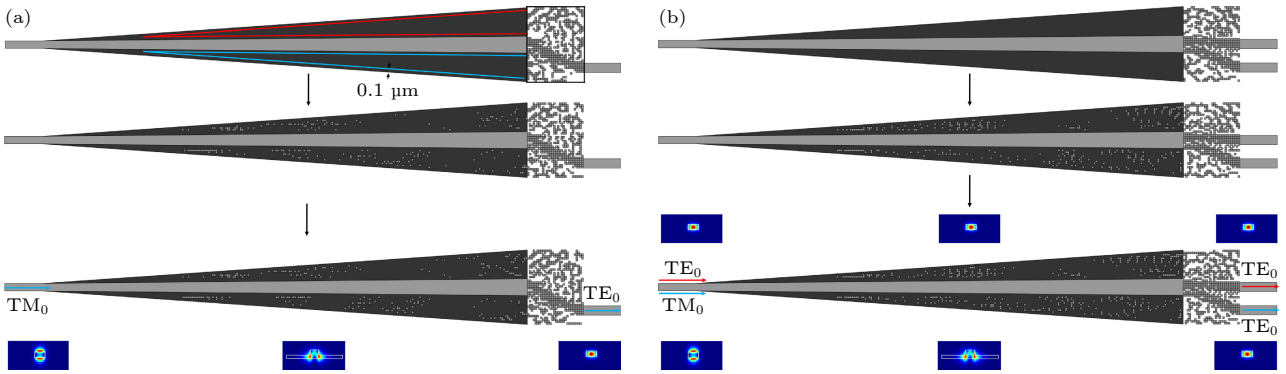


图 4 PR 和 PSR 的仿真结构 (a) PR 的初始结构、中间结构和最终结构; (b) PSR 的初始结构、中间结构和最终结构

Fig. 4. Simulated structures of the PR and PSR: (a) Initial, intermediate, and final structures of the PR; (b) initial, intermediate, and final structures of the PSR.

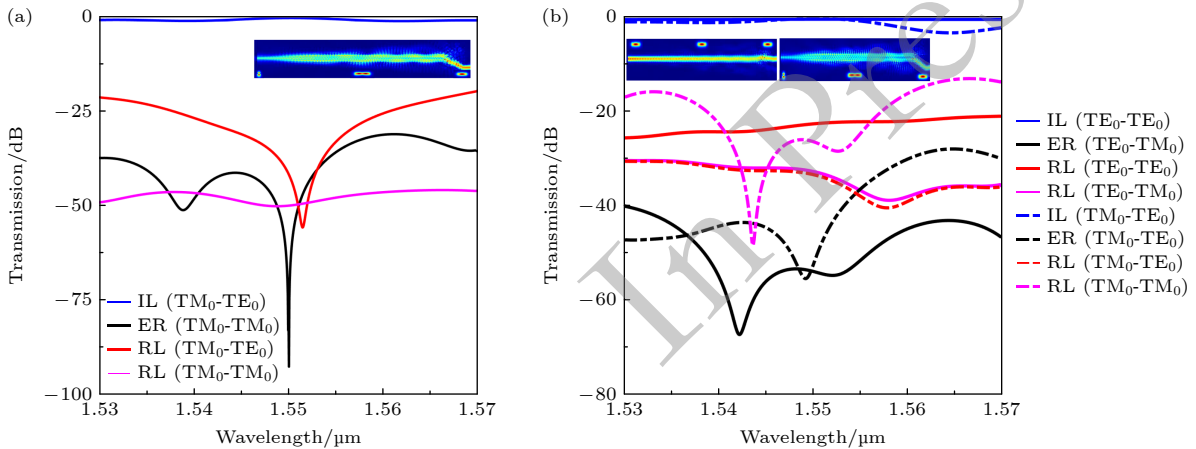


图 5 PR 和 PSR 的仿真结果 (a) PR 的透射光谱; (b) PSR 的透射光谱

Fig. 5. Simulated results of the PR and PSR: (a) Transmission spectra of the PR; (b) transmission spectra of the PSR.

其中 $T_{i,j}$ 是 i 模式输入时 j 模式透射率; R_i 是 i 模式的反射透射率. PR 的仿真结果表明, 在 1550 nm 波长处, 对于 TM_0 - TE_0 模式转换, 其 IL 和 ER 分别约为 0.2 dB 和 79.8 dB , TE_0 和 TM_0 的 RL 分别约为 41.5 dB 和 50 dB ; PSR 的仿真结果表明, 在 1550 nm 波长处, 对于 TE_0 - TE_0 模式转换, 其 IL 和 ER 分别约为 0.4 dB 和 53.7 dB , TE_0 和 TM_0 的 RL 分别约为 22.5 dB 和 32.6 dB , 而对于 TM_0 - TE_0 模式转换, 其 IL 和 ER 分别约为 0.3 dB 和 52.7 dB , TE_0 和 TM_0 的 RL 分别约为 33.3 dB 和 26.3 dB .

4 讨论

4.1 工作带宽分析

在 1550 nm 单一波长处, 所设计 PR 和 PSR 的 ER 均达到大于 50 dB 的目标. 由于 FOM 函数

仅仅对器件在 1550 nm 波长处的性能进行了约束, 算法会优先确保器件在 1550 nm 波长下达到预期性能, 因此在一定带宽范围内 ER 会有所降低. 以 40 dB ER 为基准, PR 的有效带宽为 1534—1553 nm; PSR 的 TE₀-TE₀ 模式转换的有效带宽为 1530—1570 nm, 而 TE₀-TM₀ 模式转换的有效带宽为 1530 nm 到 1553 nm.

为了有目的性的设定工作带宽, 可以在算法 FOM 函数中对带宽加以约束. 这里以 PR 在 1540 nm 到 1560 nm 工作带宽的优化为例进行说明, PR 的 FOM 函数定义为:

$$\text{FOM} = \alpha \times \left| \overline{T}_{\text{TM}_0\text{-TE}_0}^{1540\text{-}1560} \right| - (1 - \alpha) \times \left| \overline{T}_{\text{TM}_0\text{-TM}_0}^{1540\text{-}1560} \right|, \quad (12)$$

其中 \overline{T}_{i-j}^k 是 i 模式输入时 j 模式在 k 波段的平均透射率. 经过算法优化, PR 的最终结构、光场分布和模拟透射光谱分别如图 6(a)—(c) 所示. 在 1540—1560 nm 的带宽范围内, PR 的 IL 和 ER 分别小于 0.6 dB 和大于 50.3 dB, TE₀ 和 TM₀ 的 RL 分别大于 24.9 dB 和 24.3 dB.

4.2 制备容差分析

考虑到实际加工过程中的随机性与不可避免的误差, 对器件开展制备容差分析是必要的. 如图 7(a), (b) 所示, 肋部厚度和像素尺寸的变化会对 PR 的性能产生一定影响. 但是, 肋部厚度偏差在 -5—5 nm 的范围时, 在 1550 nm 波长处, PR 的 IL 仍小于 1.6 dB, ER 和 RL 分别大于 18.6 dB 和 23.4 dB; 像素尺寸偏差在 0—10 nm 的范围时, PR 的 IL 仍小于 0.9 dB, ER 和 RL 分别大于 33.8 dB

和 20.5 dB. 此外, 如图 7(c), (d) 所示, 肋部厚度和像素尺寸的变化对 PSR 性能的影响较小. 肋部厚度偏差在 -10—10 nm 的范围时, 对于 TE₀-TE₀ 模式转换, PSR 的 IL 仍小于 0.5 dB, ER 和 RL 分别大于 44.1 dB 和 22.1 dB, 而对于 TM₀-TE₀ 模式转换, IL 仍小于 1.5 dB, ER 和 RL 分别大于 23.4 dB 和 17.7 dB. 像素偏差在 -10—10 nm 的范围时, 在 1550 nm 波长处, 对于 TE₀-TE₀ 模式转换, PSR 的 IL 仍小于 0.9 dB, ER 和 RL 分别大于 32.9 dB 和 17.2 dB, 而对于 TM₀-TE₀ 模式转换, IL 仍小于 1.1 dB, ER 和 RL 分别大于 32.4 dB 和 17.3 dB.

4.3 器件性能对比

为了凸显逆向设计 PR 和 PSR 的小尺寸、高性能优势, 利用传统方法设计如图 8(a) 所示的 PSR 作为对比. 该器件同样设计在顶硅层厚度为 220 nm, 上包层为二氧化硅的 SOI 平台. 其偏振旋转单元脊部的输入宽度和输出宽度分别选定为 0.4 μm 和 0.836 μm. 肋部宽度从 0.4 μm 增至 4 μm, 再减小到 0.836 μm. 模式转换单元是基于非对称定向耦合器 (asymmetric directional coupler, ADC) 结构设计, 该结构是由 1 个 0.836 μm 宽的主干波导和 1 个 0.4 μm 宽的接入波导构成. 主干波导与接入波导之间的耦合间隙宽度为 0.2 μm. 接入波导后连接一个贝塞尔弯曲波导作为输出端口, 其长度为 8 μm. 主干波导与弯曲波导之间的解耦间隙宽度为 1 μm. 如图 8(b), (c) 所示, 当锥形长度和耦合长度分别为 52 μm 和 18 μm 时, 在 1550 nm 波长处, 对于 TE₀-TE₀ 模式转换, 其模拟 IL 约为

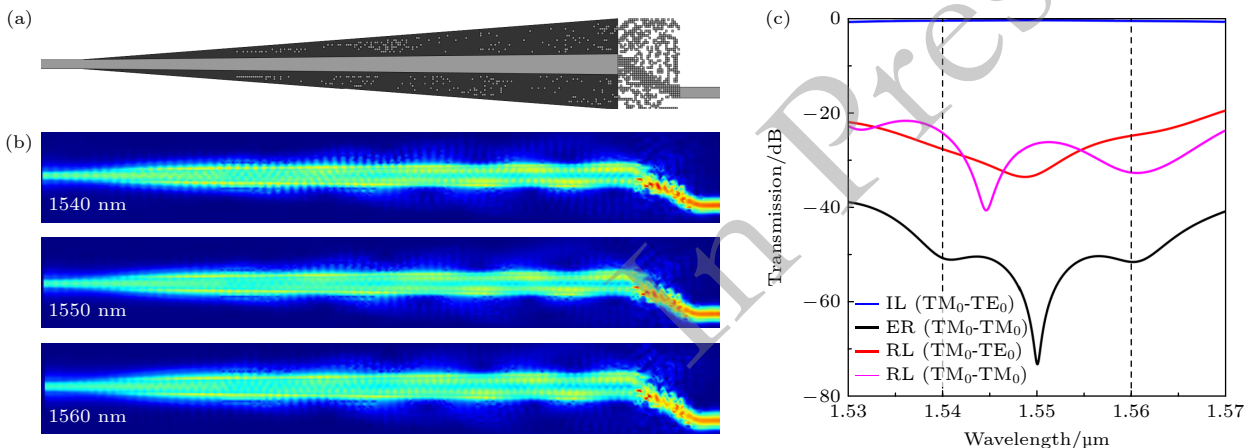


图 6 宽带 PR 的仿真结果 (a) 最终结构; (b) 光场分布; (c) 透射光谱

Fig. 6. Simulated results of the broadband PR: (a) Final structure; (b) light field distribution; (c) transmission spectra.

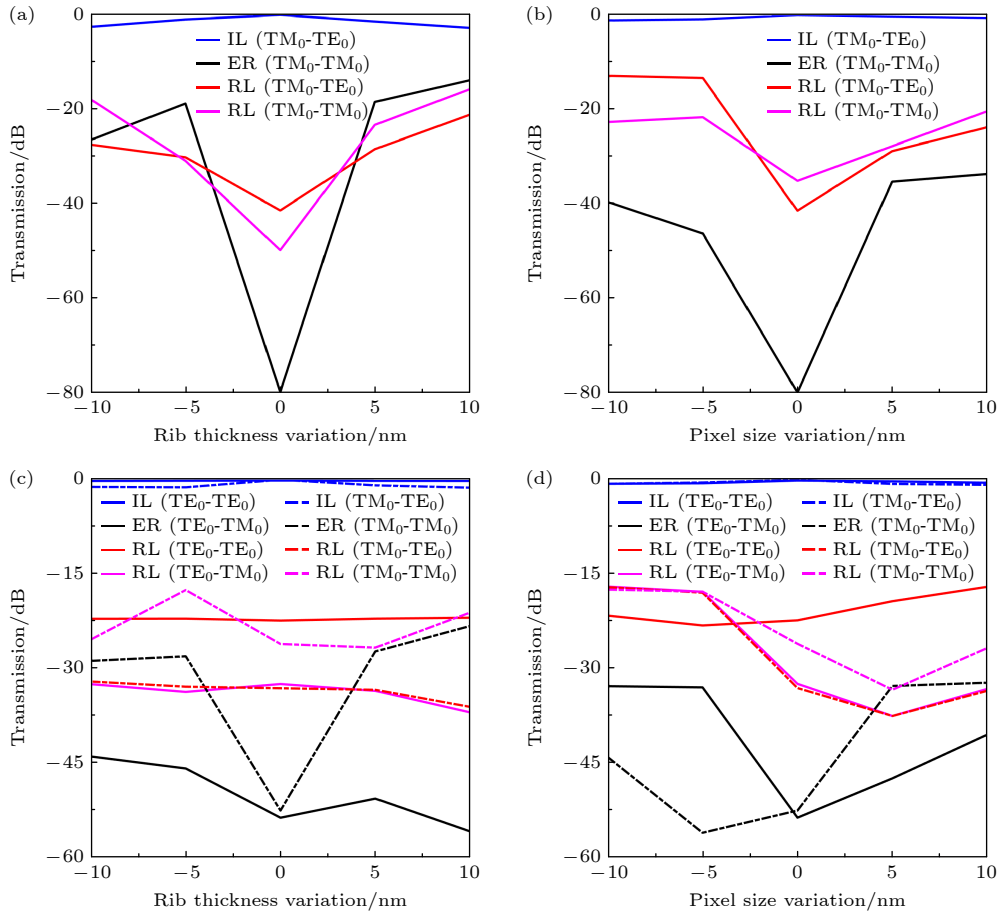


图 7 PR 和 PSR 的制备容差 (a), (b) PR 器件性能随肋部厚度和像素大小的变化; (c), (d) PSR 的器件性能随肋部厚度和像素大小的变化

Fig. 7. Fabrication tolerances of the PR and PSR: (a), (b) PR device performance variation with rib thickness and pixel size; (c), (d) PSR device performance variation with rib thickness and pixel size.

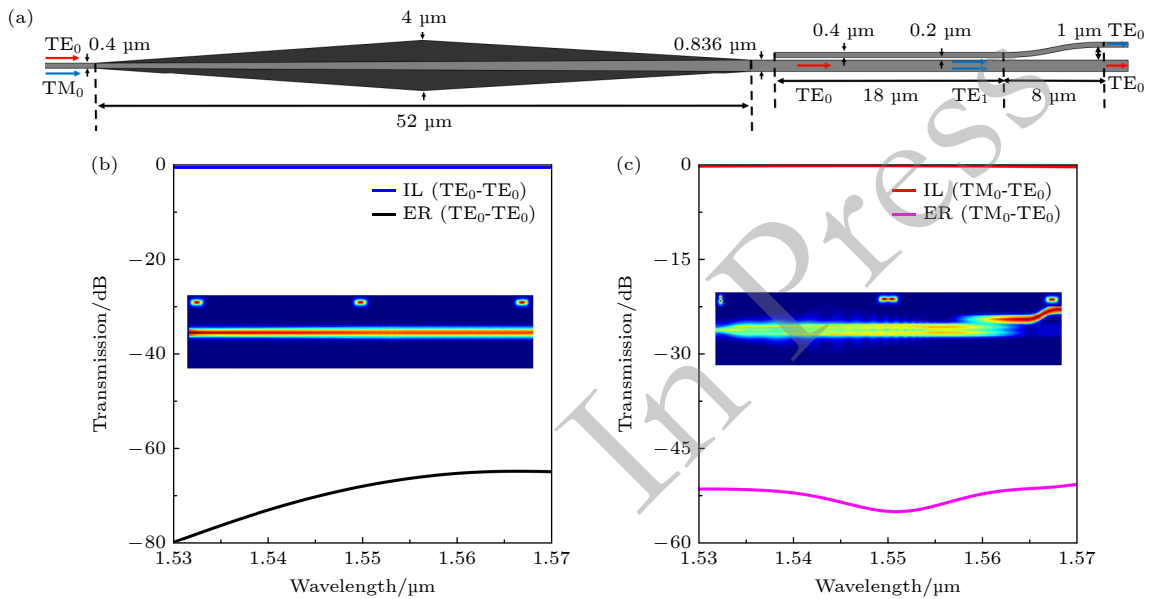


图 8 传统波导 PSR 的仿真结果 (a) PSR 的结构; (b), (c) PSR 的透射光谱

Fig. 8. Simulated results of the traditional PSR: (a) PSR Structure. (b), (c) Transmission spectra of the PSR.

表 1 PR 和 PSR 性能对比

Table 1. Performance comparisons of reported PRs and PSRs.

Structure	Design scheme	Length/ μm	Performance/dB	Bandwidth/nm
[18]	Mode evolution	400	Measured CT < -13	1530—1580
[23]	Mode hybridization	23	Measured ER > 17	1500—1540
[24]	ADC	24	Simulated ER > 19	1500—1600
[16]	ADC and DBS algorithm	10.8	Simulated CT < -17	1500—1600
This work	Mode evolution and DBS algorithm	29	Simulated ER > 50	1550

0.1 dB, ER 约为 67.8 dB; 在 1550 nm 波长处, 对于 $\text{TM}_0\text{-TE}_0$ 模式转换, 模拟 IL 约为 0.3 dB, ER 约为 54.9 dB; 可以看出, 传统方法和逆向设计方法设计的 PSR, 在性能差异并不显著的情况下, 传统 PSR 的有效长度约为逆向设计 PSR 的 2.5 倍.

PR 和 PSR 的设计大致可基于 3 种机制展开, 分别为模式演化、模式杂化以及模式耦合. 表 1 将本文所设计的器件与先前已报道的相关成果进行了对比分析. 为确保对比条件的一致性, 所选取用于对比的器件均设计在具备二氧化硅包层的 SOI 平台上. Sacher 等^[18] 依据模式演化理论, 设计出一种双层锥形波导 PSR, 在 1530—1580 nm 的波长范围内, 该器件的 CT 小于 -13 dB. 不过, 此器件采用传统波导设计方式, 导致其尺寸偏大, 长度约为 400 μm . Xie 等^[23] 基于模式杂化理论, 提出了一种双阶梯硅波导 PR. 该器件尺寸较小, 仅为 23 μm , 但这种结构在加工过程中必须通过三步蚀刻才能完成, 加工工艺相对复杂. Wang 等^[24] 基于模式耦合理论, 报道了一种长度约为 24 μm 的 ADC 结构 PSR, 在 1500—1600 nm 的带宽范围, 该器件的 ER 大于 19 dB. 然而, 该结构的顶硅层厚度为 250 nm, 这使得它很难与顶部硅厚度为 200 nm 的其他光子器件实现集成. 同时, Qiao 等^[16] 采用 DBS 算法对 ADC 结构 PSR 进行了优化, 器件尺寸为 10.8 $\mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$, CT 小于 -17 dB. 该器件运用逆向设计方法进行优化, 尺寸较小, 但 CT 值表现并不理想. 可见, 本文的工作不仅成功缩短了 PR 和 PSR 的长度, 而且在保持 IL 的同时实现了高 ER.

随着片上集成度的持续提升, 片上结构的双折射效应愈发显著, 这导致几乎所有的硅基光器件均呈现出偏振相关性. 此外, 光信号的偏振态在沿光纤传播过程中不断发生变化, 当信号光抵达片上接收端时, 其随机的偏振态与片上所支持的偏振态之间会存在严重的偏振失配问题. 为解决光子器件面

临的偏振态难题, 偏振分集是常用的有效手段. 该方法先将入射的偏振态分离至对应的片上波导, 对两个偏振分量分别进行处理后合束输出. 例如, Zhao 等^[25] 成功实现了一个 96 通道的可重构增减复用系统, 该系统利用 PR 和 PSR, 将输入的 TM 偏振模式转换为 TE 模式, 经处理后再转换回 TM 模式输出. 因此, 作为偏振分集电路中的核心元件, 超紧凑、高性能的 PR 和 PSR 为解决片上电路面临的偏振态问题提供了高效且可靠的方案.

5 结 论

SOI 因其高折射率差以及与互补金属氧化物半导体技术的兼容性, 逐渐成为光子集成电路的常用平台. 同时, 该平台高折射率差的特性, 也引发了较为严重的双折射效应, 导致大多数硅基光子器件都面临着偏振相关问题. 本文基于双层锥形波导的模式演化理论, 并借助 DBS 算法进行进一步优化, 设计了尺寸仅为 29 $\mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ 的 PR 和 PSR. PR 的仿真结果表明, 在 1550 nm 波长处, 对于 $\text{TM}_0\text{-TE}_0$ 模式转换, 其 IL 和 ER 分别约为 0.2 dB 和 79.8 dB, TE_0 和 TM_0 的 RL 分别约为 41.5 dB 和 50 dB; PSR 的仿真结果表明, 在 1550 nm 波长处, 对于 $\text{TE}_0\text{-TE}_0$ 模式转换, 其 IL 和 ER 分别约为 0.4 dB 和 53.7 dB, TE_0 和 TM_0 的 RL 分别约为 22.5 dB 和 32.6 dB, 而对于 $\text{TM}_0\text{-TE}_0$ 模式转换, 其 IL 和 ER 分别约为 0.3 dB 和 52.7 dB, TE_0 和 TM_0 的 RL 分别约为 33.3 dB 和 26.3 dB. 本文对小尺寸、高性能 PR 和 PSR 的研究, 为解决硅基光子器件所面临的偏振相关问题提供了参考.

参考文献

- [1] Tkach R W 2010 *Bell Labs Tech. J.* **14** 3
- [2] Yang Y L, Wu Y, Hou M Z, Luo J S, Xie X L 2023 *Neural Process. Lett.* **55** 7135.
- [3] Zhang J W, Bhuiyan M Z A, Yang X, Wang T, Xu X S,

- Hayajneh T, Khan F 2021 *IEEE Internet Things J.* **9** 22184
- [4] Li C, He A L, Wen Y H, Liu G, Chronopoulos A T 2023 *IEEE T. Serv. Comput.* **16** 3550
- [5] Fukuda H, Yamada K, Tsuchizawa T, Watanabe T, Shinojima H, Itabashi S I 2008 *Opt. Express* **16** 4872
- [6] Dai D X, Bowers J E 2011 *Opt. Express* **19** 10940
- [7] Sun Q K, Chen H X, Wang T, Wang J Q, Yang J H, Jia H 2022 *Opt. Commun.* **522** 128665
- [8] Liu Y J, Wang S, Wang Y J, Liu W, Xie H C, Yao Y, Song Q H, Zhang X L, Yu Y, Xu K 2019 *Opt. Lett.* **44** 4495
- [9] Zhao W K, Peng Y Y, Zhu M Y, Liu R R, Hu X L, Shi Y C, Dai D X 2024 *Photonics Res.* **12** 183
- [10] Zhao W K, Liu R R, Peng Y Y, Yi X L, Chen H T, Dai D X 2022 *Nanophotonics* **11** 2293
- [11] Wang Z C, Dai D X 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** 747
- [12] Liu S W, Huo Y J, Cheng C, Niu J Q, Fu X, Yang L 2024 *J. Lightwave Technol.* **42** 1
- [13] Shen B, Wang P, Polson R, Menon R 2015 *Nat. Photonics* **9** 378
- [14] Cheng J W, Huang C R, Zhang J L, Wu B, Zhang W K, Liu X Y, Zhang J H, Tang Y Y, Zhou H L, Zhang Q M, Gu M, Dong J J, Zhang X L 2024 *Nat. Commun.* **15** 6189
- [15] Ma H S, Du T, Zhang Z J, Jiang X P, Fang L, Yang J B 2023 *Opt. Commun.* **526** 128912
- [16] Qiao X, Li Y H, Liu Y J, Zang Z G, Xu K 2025 *ACS Photonics* **12** 3256
- [17] Dai D X, Wu H 2016 *Opt. Lett.* **41** 2346
- [18] Sacher W D, Barwicz T, Taylor B J F, Poon J K S 2014 *Opt. Express* **22** 3777
- [19] Ma H S, Yang J B, Zhao N, Chen H, Zhang Z J, Peng M, Du T, Jiang X P, Wu J G 2024 *Opt. Express* **32** 42908
- [20] Fernández de Cabo R, Sánchez-Sánchez A, Yang Y J, Melati D, Alonso-Ramos C, Velasco A V, González-Andrade D 2024 *Nanophotonics* **13** 4037
- [21] Chang W J, Lu L L Z, Ren X S, Li D Y, Pan Z P, Cheng M F, Liu D M, Zhang M M 2018 *Opt. Express* **26** 8162
- [22] Zhou S R, Wang Z C, Nong J, Li H T, Du T, Ma H S, Li S Q, Deng Y H, Zhao F, Zhang Z J, Chen H, Yang Y, Zhang Z F, Yang J B 2024 *Opt. Express* **32** 8506
- [23] Xie A B, Zhou L J, Chen J P, Li X W 2015 *Opt. Express* **23** 3960
- [24] Wang J, Niu B, Sheng Z, Wu A M, Wang X, Zou S C, Qi M H, Gan F W 2014 *Opt. Express* **22** 4137
- [25] Zhao W K, Peng Y Y, Cao X P, Zhao S, Liu R R, Wei Y H, Liu D J, Yi X L, Han S T, Wan Y J, Li K, Wu G Z, Wang J, Shi Y C, Dai D X 2022 *Nanophotonics* **11** 4299

Silica-cladding polarization rotator and polarization splitter-rotator with 50 dB extinction ratio*

MA Hansi^{1)†} LIN Zhen¹⁾ HU Dingqi¹⁾ LUO Yiqian¹⁾ KUANG Yingle¹⁾
 ZHANG Ting¹⁾ XIA Haolin¹⁾ TONG Yongdong¹⁾ CAO Yi¹⁾
 GAO Huiqin²⁾ GONG Yinli¹⁾ GAN Longfei¹⁾ ZHAO Na¹⁾
 YANG Junbo^{2)‡} WU Jiagui^{3)††}

1) (School of Microelectronics and Physics, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China)

2) (School of Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

3) (School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(Received 19 January 2026; revised manuscript received 14 March 2026)

Abstract

Silicon on insulator (SOI) is becoming a common platform for photonic integrated circuits because of the high refractive index contrast and the compatibility with complementary metal-oxide- semiconductor technology. The high refractive index contrast enhances the integration capability, but it also causes serious

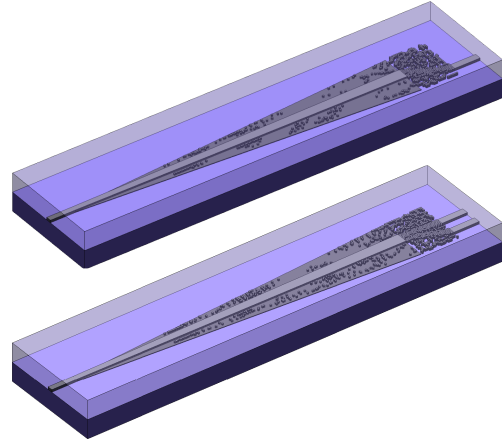
* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFF0706005), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62305387, 12305268, 12075014), the Foundation of National University of Defense Technology (Grant No. ZK23-03), the Natural Science Foundation of Hunan Province (Grant Nos. 2023JJ40683, 2023JJ40223, 2024JJ6184, 2023JJ30195), and the Scientific Research Foundation of Hunan Provincial Education Department (Grant Nos. 24B0575, 22B0655, 22A0435).

† Corresponding author. E-mail: mahansi2024@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn

†† Corresponding author. E-mail: mgh@swu.edu.cn

birefringence effects. Therefore, polarization sensitivity has become a major challenge for most silicon-based optical devices. Polarization diversity schemes are often used to address the polarization issues. Polarization rotators (PRs) and polarization splitter-rotators (PSRs) are the key components of polarization-diversity circuits. To achieve a balance between small size and high extinction ratio (ER), the $29\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ PR and PSR with 50 dB ER are proposed via an inverse design algorithm based on the mode evolution of a bi-level taper waveguide. The simulated results of PR indicate that the insertion loss (IL) and ER for the $\text{TM}_0\text{-TE}_0$ modes are about 0.2 dB and 79.8 dB at 1550 nm, and the reflection losses (RLs) of TE_0 and TM_0 are about 41.5 dB and 50 dB. The simulated results of PSR indicate that the IL and ER for the $\text{TE}_0\text{-TE}_0$ modes are about 0.4 dB and 53.7 dB at 1550 nm, and the RLs of TE_0 and TM_0 are about 22.5 dB and 32.6 dB. In addition, the IL and ER for the $\text{TM}_0\text{-TE}_0$ modes are about 0.3 dB and 52.7 dB at 1550 nm, and the RLs of TE_0 and TM_0 are about 33.6 dB and 26.3 dB. The proposed devices on the SOI platform with 220-nm-thick top silicon layer and silica cladding are highly compatibility with conventional silicon-based optical devices. This work provides a reference for addressing polarization-sensitivity problems in silicon-based optical devices.



Keywords: 50 dB extinction ratio, polarization rotator, polarization splitter-rotator, silica cladding

DOI: [10.7498/aps.75.20260095](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260095)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260095](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260095)