

硅基槽式微环谐振腔型偏振解复用器全矢量分析

肖金标 罗辉 徐银 孙小菡

Full-vectorial analysis of a polarization demultiplexer using a microring resonator with silicon-based slot waveguides

Xiao Jin-Biao Luo Hui Xu Yin Sun Xiao-Han

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 194207 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.194207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

硅基光子集成研究进展

[Research progress of silicon-based photonic integration](#)

物理学报.2014, 63(10): 104218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104218>

基于 Add-drop 型微环谐振腔的硅基高速电光调制器设计

[Design of a high-speed silicon electro-optical modulator based on an add-drop micro-ring resonator](#)

物理学报.2013, 62(19): 194210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.194210>

统一非对称光波导横向耦合模理论分析

[Analysis of unified unsymmetric lateral coupled-mode theory of optical waveguide](#)

物理学报.2013, 62(18): 184213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.184213>

基于热膨胀效应的可调光功率分束器设计

[Design of tunable optical power splitter based on thermal expansion effect](#)

物理学报.2013, 62(2): 024218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024218>

TE-TM 模变换型光波导隔离器的理论研究

[Operation principle of optical waveguide isolator based on TE-TM mode conversion](#)

物理学报.2012, 61(16): 164201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.164201>

硅基槽式微环谐振腔型偏振解复用器全矢量分析*

肖金标[†] 罗辉 徐银 孙小菡

(东南大学电子科学与工程学院, 南京 210096)

(2015年4月23日收到; 2015年5月11日收到修改稿)

提出一种紧凑型偏振解复用器, 其中两条常规硅基波导作为输入/输出信号通道, 居于其中的槽式微环谐振腔用于偏振态/波长选择组件. 采用全矢量频域有限差分法详细分析了硅基常规及槽波导的模式特性, 结果发现其横磁模的模场布及其有效折射率相似, 而其横电模相应的特性则差异明显, 结果输入横磁模能够在谐振工作波长下从下路端口输出, 而输入横电模与微环耦合可以忽略, 直接从直通端口输出, 从而实现两偏振态的高效分离. 采用全矢量时域有限差分法详细分析了该偏振解复用器的光波传输特性, 结果表明, 当微环半径为 $3.489\ \mu\text{m}$ 时, 在 $1.55\ \mu\text{m}$ 工作波长下, 横磁模与横电模的消光比与插入损耗分别为 ~ 26.12 (36.67) dB与 ~ 0.49 (0.09) dB. 另外, 论文详细讨论了器件关键结构参数的制作容差, 并给出了输入模场在器件中的传输演变情况.

关键词: 偏振解复用器, 槽波导, 微环谐振腔, 硅光子学

PACS: 42.82.-m, 42.79.Gn

DOI: 10.7498/aps.64.194207

1 引言

基于绝缘体上硅 (silicon on insulator, SOI) 的光子集成回路具有高折射率差及与标准互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 工艺兼容等优点, 能够有效缩减组件尺寸, 利于实现各类光子器件的单片或混合集成, 形成片上光子信号处理系统, 如片上光信号传输系统, 在超级计算机或数据中心^[1,2]的光互联方面有很好的应用前景. 为适应当前光互联容量的激增需求, 各类复用技术, 如波分复用技术 (wavelength division multiplexing, WDM)^[3]、空分复用技术 (space division multiplexing, SDM)^[4]及偏振复用技术 (polarization division multiplexing, PDM)^[5,6]已广泛应用于片上光互联系统中. WDM技术已广泛用于长距离光通信网络, 极大地提高了通信容量. 但是, WDM系统对激光光源的芯片集成应用方面提出了严格要求, 如多波长

传输、波长管理、紧凑封装及低功耗等; 在SDM系统中传输波导支撑数个模式, 采用多芯或多模结构, 封装尺寸相对较大; 在SOI材料系中, 由于横磁模 (transverse magnetic mode, TM) 与横电模 (transverse electric modes, TE) 有不同模式特性, PDM系统有尺寸紧凑、结构相对简单等特点. 由于两个偏振态在传输过程中会受到偏振模色散、偏振相关损耗以及输入信号非正交等因素影响, 偏振态产生形变而相互干扰. 因此, 对于PDM技术而言, 在接收端实现信号的解复用为其核心技术. 为实现混合传输信号的有效分离, 各类基于不同结构的偏振分束器 (polarization beam splitter, PBS), 如定向耦合器^[7-9]、多模干涉耦合器^[10]、马赫-曾德干涉仪^[11]、光子晶体结构^[12]与阵列波导光栅^[13]已广泛应用于PDM系统中. 在此基础上, 基于PDM技术的WDM系统能够进一步提高复用系统传输容量^[14]. 但是, 目前报道的PBS与片上微环型WDM系统难以兼容. 因此, 需要提出新颖的偏振复用/解复用器 (polarization (de) multiplexer,

* 国家自然科学基金 (批准号: 60978005) 和江苏省自然科学基金 (批准号: BK20141120) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jbxiao@seu.edu.cn

P-DEMUX), 不仅要求结构紧凑, 而且能与现有微环型 WDM 片上传输系统兼容性.

硅基微环谐振器^[15-18]具有优越的光谱特性与偏振特性, 被广泛研究并应用于调制器、滤波器、光开关及光复用/解复用器之中, 而硅基微环谐振腔 WDM 传输系统被认为是成为下一代内部芯片光互连极具前景的解决方案, 具有紧凑型封装、低功耗与 CMOS 工艺兼容性等优势^[19,20]. 目前, 研究人员在文献^[21]中提出一种基于“垂直耦合”结构的微环谐振腔型 PBS, 微环半径 45 μm 、工作波长 1.55 μm 时消光比为 20 dB, 并获得较为理想的 TE 模与 TM 模的光谱响应. 显然, 该器件结构尺寸大, 不利于实现片上集成. 由于 TE 与 TM 模的模式特性与耦合系数差异, 微环谐振器具有不同的谐振波长与较强的偏振依赖性. 因此, 以硅基微环谐振器为基本单元, 利用其结构特性构建偏振解复用器件, 可实现模式分离. 近年来, 槽波导由于其独特的模式特性及应用潜力, 引起广泛关注^[22-29]. 在槽波导中, 高折射率波导紧夹一个纳米量级的低折射率区域, 称之为“槽”或“缝”. 由于在介质分界面具有高折射率差, 电场法向分量不连续, 以满足电通量密度连续, 继而在槽区“激发”出较高的电场幅值, 使模场集中限制在低折射率槽区. 槽波导承载的 TE 与 TM 模在模场分布及有效折射率方面有很大差异, 利用这一特性, 已设计或研制出众多新颖的光子器件, 如光传感器^[23]、偏振分束器^[25-27]与偏振旋转器^[28]等. 目前, 基于槽波导结构的微环谐振腔型 P-DEMUX 鲜有文献报道.

本文提出一种紧凑型硅基 P-DEMUX 器件, 其中两条常规硅基波导用于输入/输出载波信号、槽式微环结构位于输入/输出波导之间. 由槽波导模式特性与微环谐振腔的偏振依赖关系, TE 与 TM 模在耦合作用及谐振效应方面差异明显. 因此, 通过优化结构参数, 在工作波长为 1.55 μm 时 TM 模谐振明显, 从下路端口输出, TE 模几乎没有谐振, 从输入波导直接输出, 从而实现两偏振态的高效分离. 该 P-DEMUX 与片上微环谐振型 WDM 系统完全兼容, 可有效提高片上系统传输容量. 采用全矢量频域及时域有限差分法对 P-DEMUX 进行了优化设计, 分析结果表明, 当 P-DEMUX 的微环谐振腔半径为 3.489 μm 、工作波长为 1.55 μm 时, TM 模、TE 模在相应端口的消光比分别为 ~ 26.12 dB 与 ~ 36.67 dB, 插入损耗分别为 ~ 0.49 dB 与 ~ 0.09 dB. 最后详细分析了器件关键

结构参数的制作容差, 并给出了模场在其中的传输演变情况.

2 器件结构与工作原理

图 1 (a), (b) 分别给出了 P-DEMUX 三维结构与耦合区截面(虚线所示)示意图, 槽式微环谐振腔居中, 与两侧平行条载硅基波导形成耦合区, 即两个定向耦合器, 由直硅基条载波导及弯曲槽式硅基波导构成, 分别用于输入/输出通道与偏振态/波长选择组件, 其中 R 为微环谐振腔半径. 输入端口 (input port)、直通端口 (through port) 与下路端口 (drop port) 分别表示信号传输的输入与输出接口. 对于 TM 模, 硅基条载波导与槽式硅基波导的模场分布及有效折射率相似, 输入端口的模场可耦合至微环中, 在特定波长下可产生谐振效应, 使其从下路通道输出; 对于 TE 模, 两波导承载的模式差异明显, 对于任意波长, 输入端口的模场几乎可忽略微环, 从直通通道输出. 通过优化设计, 输入信号中 TM 模耦合作用和谐振效应明显, TE 模在输入通道中能量衰减低, 从而实现两偏振态 (TE/TM) 的高效分离.

在以下分析及计算中, 如无特别指明, 器件结构参数为: 硅 (Si) 折射率为 3.478、二氧化硅 (SiO_2) 折射率为 1.444、基底 (Substrate) 为硅、波导高度 $h = 250$ nm, w_{slot} 与 w_r 分别表示槽宽与微环波导宽度、 w_g 表示微环与输入/输出波导间的最短间距、 w_H 表示输入/输出波导宽度, 如图 1 (b) 所示. 此外, 器件工作在波长 $\lambda = 1.55$ μm , 光场传输方向如图 1 所示. 可以看出, 该 P-DEMUX 有紧凑型封装的潜力优势, 并与微环 WDM 系统兼容.

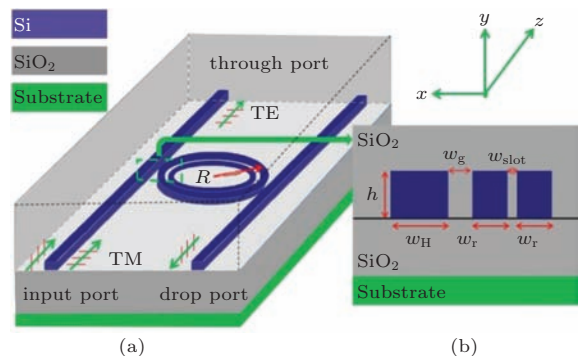


图 1 (网刊彩色) (a) P-DEMUX 结构示意图; (b) 耦合区截面示意图

Fig. 1. (color online) (a) Schematic layout of the proposed P-DEMUX and (b) its cross-section of the coupling area.

3 数值结果与讨论

采用频域有限差分 (finite-difference frequency-domain, FDFD) 全矢量模解器 [30,31] 分析常规硅基波导及槽波导的模式特性, 其矩阵形式如下:

$$-j\omega\mu_0 \begin{bmatrix} T_x & 0 & 0 \\ 0 & T_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -j\beta I & -A_y \\ j\beta I & 0 & A_x \\ B_y & -B_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}, \quad (1a)$$

$$j\omega\epsilon_0 \begin{bmatrix} T_x & 0 & 0 \\ 0 & T_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x & 0 & 0 \\ 0 & N_y & 0 \\ 0 & 0 & N_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -j\beta I & -C_y \\ j\beta I & 0 & C_x \\ D_y & -D_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix}, \quad (1b)$$

式中 $E_x(H_x)$, $E_y(H_y)$, $E_z(H_z)$ 表示电场(磁场)分量, I 为单位矩阵, N_x, N_y, N_z 为对角矩阵, β 为传播常数, 参数详细定义可阅文献 [31]. 由 $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$

($\mathbf{D} = \epsilon_0\epsilon_r\mathbf{E}$) 及 $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$, (1) 式可简化为关于两个横向电场分量(即 E_x, E_y) 的本征值方程:

$$\begin{bmatrix} P_{xx} & P_{xy} \\ P_{yx} & P_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中算符 $P_{xx}, P_{xy}, P_{yx}, P_{yy}$ 在文献 [31] 有其详细表达式. 同理, 可获得关于 H_x 和 H_y 的相应方程.

图 2 给出了常规硅基波导及槽波导 TE 模电场主分量 (E_x) 及 TM 模电场主分量 (E_y) 的模场分布. 从图 2(a), (b) 可以看出, 对于硅基波导, TE 与 TM 模电场能量主要分布在高折射率区, 即波导芯层, 在波导内形成稳定的传输模式; 而对于槽波导, 槽两侧的垂直介质分界面存在高折射率差, 使 TE 模的主分量 E_x (法向分量) 不连续, 继而在低折射率的槽区“激发”出更高幅值, 将 TE 模场集中“限制”在槽区, 形成真正意义上的导模而非辐射模, 如图 2(c) 所示. 其模场分布与硅基波导 TE 模的主分量 (E_x) 明显不同, 而 TM 模对于硅基波导与槽波导有相似的模场分布. 因此, 对于 TM 模, 输入端口的模场可耦合至微环中, 在特定波长下可产生谐振效应, 使其从下路通道输出; 对于 TE 模, 输入端口的模场几乎可忽略微环, 从直通通道输出, 从而实现两偏振态的高效分离.

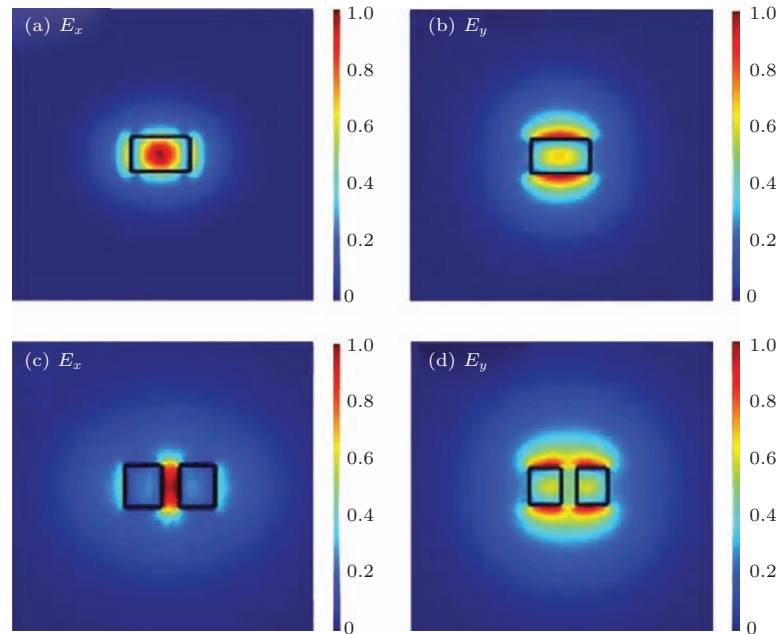


图 2 (网刊彩色) (a) TE, (b) TM 电场主分量在常规硅基波导中的场分布; (c) TE, (d) TM 电场主分量在槽波导中的场分布

Fig. 2. (color online) The field distributions of the major components for the (a) TE and (b) TM in an individual regular silicon-based waveguide, and (c) TE and (TM) in an individual slot waveguide.

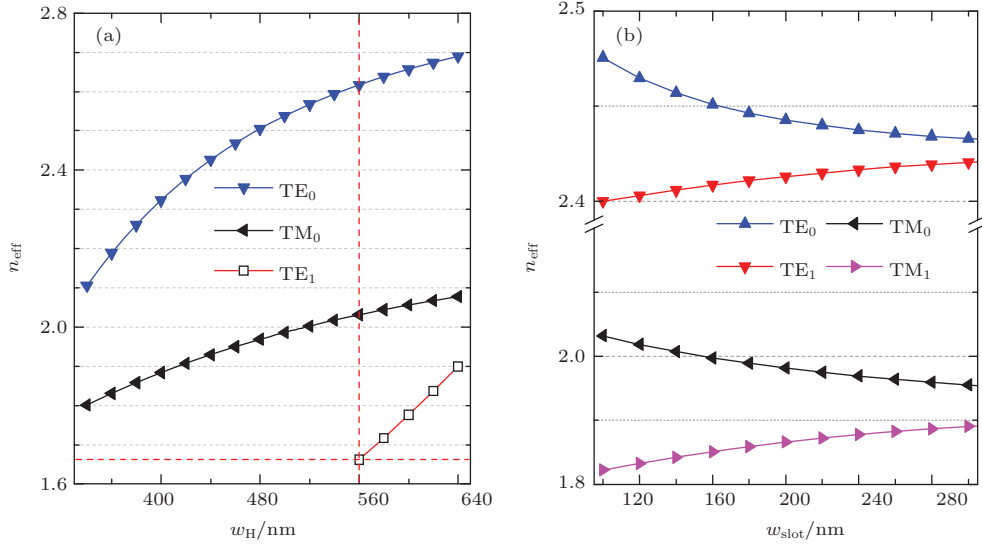

 图3 (网刊彩色) 模式有效折射率 n_{eff} 随 (a) w_H (b) w_{slot} 的变化关系

 Fig. 3. (color online) The effective indices of modes as functions of (a) w_H and (b) w_{slot} .

图3(a)给出了输入/输出硅基波导模式有效折射率 n_{eff} 随宽度 w_H 的变化关系. 可以看出, 当 w_H 从320 nm增大至640 nm时, n_{eff} 逐渐单调增长, 呈近似正比关系. 当 $w_H < 560$ nm时, 该波导只能承载“基模”, 实现单模工作. 图3(b)中给出了硅基槽波导模式有效折射率 n_{eff} 与槽宽 w_{slot} 的变化关系, 当槽宽 w_{slot} 从100 nm增大至300 nm时, 次高阶模 (TE_1 与 TM_1 模) 的有效折射率 n_{eff} 逐渐增大, 而基模 (TE_0 与 TM_0 模) 的有效折射率 n_{eff} 逐渐减小. 当 $w_H = 440$ nm, $w_{\text{slot}} = 150$ nm时, 硅基波导与槽波导的TM基模有相似的有效折射率及模场分布, 输入端口的模场可耦合至微环中; 而TE基模的有效折射率差异明显, 与微环的相互耦合作用几乎可忽略.

另外, 输入/输出硅基波导与微环形成两个定向耦合器, 但耦合间距随传输方向变化, 耦合系数 κ 不为常数. 本文采用最小间距处的耦合系数来表征该定向耦合器的耦合能力, 其中耦合系数 κ 定义^[32]为

$$\kappa = [(\pi^2 - 4\delta^2 l_c^2)/(4l - c^2)]^{1/2}, \quad (3)$$

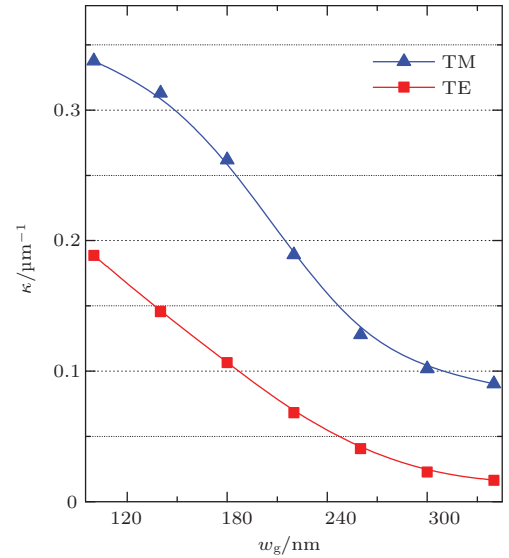
其中

$$\delta = (\beta_{\text{II}} - \beta_1)/2, \quad (4a)$$

$$l_c = \pi/(\beta_0 - \beta_1), \quad (4b)$$

式中 β_1 与 β_{II} 分别为独立硅基波导与槽式波导中的传播常数, β_0 与 β_1 分别为耦合波导基模与次高阶模的传播常数, $\beta = kn_{\text{eff}}$, k 为自由空间波数.

图4给出了TM与TE模耦合系数 κ 随间距 w_g 的变化关系. 从图中可以看出, 当 $w_g = 150$ nm时, TM (TE) 模式耦合系数 $\kappa > 0.3$ (< 0.14) μm^{-1} , 输入端口TM模场可耦合至微环中, 而TE模耦合能力很小. 随着两波导间距 w_g 增大, TM与TE基模耦合效率 κ 均减小, 但TM模耦合强度大于TE模.


 图4 (网刊彩色) TM与TE耦合系数 κ 随 w_g 的变化关系
 Fig. 4. (color online) Coupling coefficient of TM and TE modes as a function of w_g .

采用三维时域有限差分法^[33,34](three-dimensional finite-different time-domain, 3D-FDTD)并引入完善匹配层^[35](perfectly matched layer, PML)吸收边界条件, 分析器件P-DEMUX

的传输特性, 其中, 关于 E_x 和 E_y 的表达式如下:

$$\begin{aligned}
 & E_x^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) \\
 &= E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) \\
 &+ \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \left\{ \frac{1}{\Delta y} \left[H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k\right) \right] \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{\Delta z} \left[H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2}\right) \right] \right\}, \quad (5a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & E_y^{n+1}\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) \\
 &= E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) \\
 &+ \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \left\{ \frac{1}{\Delta z} \left[H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2}\right) \right] \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{\Delta x} \left[H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) \right] \right\}, \quad (5b)
 \end{aligned}$$

式中 Δx , Δy , Δz 为空间离散网格, Δt 为时间步长, i, j, k, n 为整数, 并满足 $F^n(i, j, k) = F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) = F(x, y, z, t)$. 此外, H_x, H_y, H_z, E_z 有如(5)式所示的相似关系式.

图5和图6给出了TE与TM模在直通端口与下路端口的传输光谱, 其中 $w_H = 440$ nm, $w_{\text{slot}} = 150$ nm, $w_g = 200$ nm, $w_r = 400$ nm, $R = 3.489$ μm . 从图5可以看出, 受微环的偏振依赖特性及相互耦合作用影响, 当工作波长 $\lambda = 1522.7$ nm(S波段), 1550.0 nm(C波段、工作波长)时, TM模式在微环谐振腔中产生谐振经耦合作用后从下路端口输出, TE模式直通输出. 当工作波长 $\lambda = 1536$ nm(C波段), 1564 nm(C波段)时, TE模式从直通端口输出并产生能量衰减. 从图中还可以看出, 自由光谱范围(free spectral range, FSR)约为27.3 nm, 满足光波复用系统总带宽传输需求. 如图6所示, TM模式从下路端口输出, 但在1550 nm处峰值能量大于相邻谐振波长1522.7 nm处输出能量. TE模式在下路通道传输能量低, 谐振效应能量增益几乎可忽略, 如图中下方曲线所示.

波导器件在研制过程中必定存在制作误差, 因此, 分析器件关键参数的制作容差至关重要. 采用消光比(extinction ratio, ER)与插入损耗(insertion loss, IL)表征器件P-DEMUX性能, 其定义如下:

$$ER(\text{dB}) = 10 \lg(P_O/P_X), \quad (6)$$

$$IL(\text{dB}) = -10 \lg(P_O/P_I), \quad (7)$$

式中, 在直通端口时 P_O 与 P_X 分别是TE, TM模功率, 在下路端口时 P_O 与 P_X 分别是TM, TE模功率, P_I 表示输入功率大小. 如图5和图6所示, 工作波长为1550 nm时, TM(TE)模在相应端口的ER分别为 ~ 26.12 (~ 36.67) dB, IL分别为 ~ 0.49 (~ 0.09) dB.

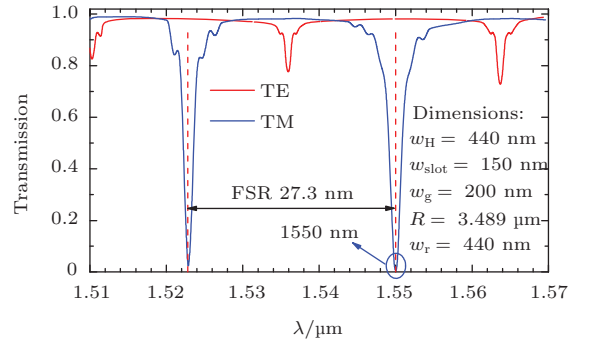


图5 (网刊彩色) TE与TM模在直通端口传输光谱
Fig. 5. (color online) The transmission spectra of TE and TM modes at the through port.

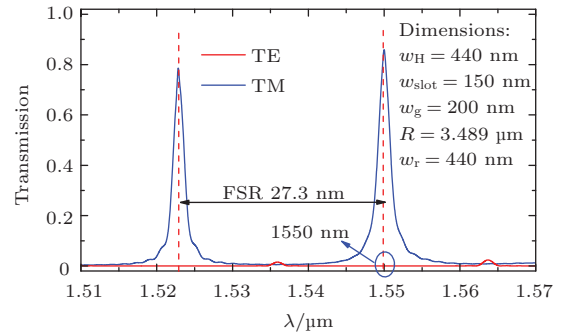


图6 (网刊彩色) TE与TM模在下路端口传输光谱
Fig. 6. (color online) The transmission spectra of TE and TM modes at drop port.

图7(a)示出了ER与IL随间距 w_g 变化关系, 其中 $\lambda = 1.55$ μm , $w_H = 440$ nm, $w_r = 440$ nm, $w_{\text{slot}} = 150$ nm, $R = 3.489$ μm . 从图中可以看出, 直通端口(TE模)ER与IL呈平缓变化趋势. 当间距 w_g 偏离198 nm时, 下路端口(TM模)ER减

小, 输出功率发生剧烈变化. 当 $ER > 18$ dB, 间距 w_g 容差约为 20 nm, 最大插入损耗约为 2.5 dB; 图 7(b) 给出了 ER 与 IL 随槽宽 w_{slot} 变化关系, 其中 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $w_H = 440$ nm, $w_r = 440$ nm, $w_g = 200$ nm, $R = 3.489 \mu\text{m}$. 由图可知, ER 随 w_{slot} 单调增长, 而 IL 变化甚微. 直通端口 (TE 模) IL 呈下降趋势. 当下路端口 (TM 模) $ER > 21$ dB, 槽宽 w_{slot} 容差约为 60 nm, IL 最大约为 1.0 dB; 图 7(c) 给出了 ER 与 IL 随波导宽度 w_H 的变化关系, 其中 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $w_r = 440$ nm, $w_g = 200$ nm, $w_{slot} = 150$ nm, $R = 3.489 \mu\text{m}$. 当输入/输出硅

基波导宽度 w_H 从 410 nm 增大至 460 nm 时, TM (TE) 模式 ER 分别大于 20(36) dB, IL 分别小于 1(0.1) dB; 图 7(d) 给出了谐振波长 λ 随半径 R 的变化关系, 其中 $w_H = 440$ nm, $w_r = 440$ nm, $w_g = 200$ nm, $w_{slot} = 150$ nm. 从图中可以获知, 谐振波长与半径呈非线性关系且灵敏度为纳米级, 如 $R = 3.485 \mu\text{m}$, $3.489 \mu\text{m}$ 时, $\lambda = 1550$ nm, 1545.5 nm. 为了提高器件制作工艺水平, 基于 SOI 平台电子束光刻 (E-beam) 与电感耦合等离子体刻蚀 (Plasma-etching) 等技术可被用于提高精度以达到所需性能要求.

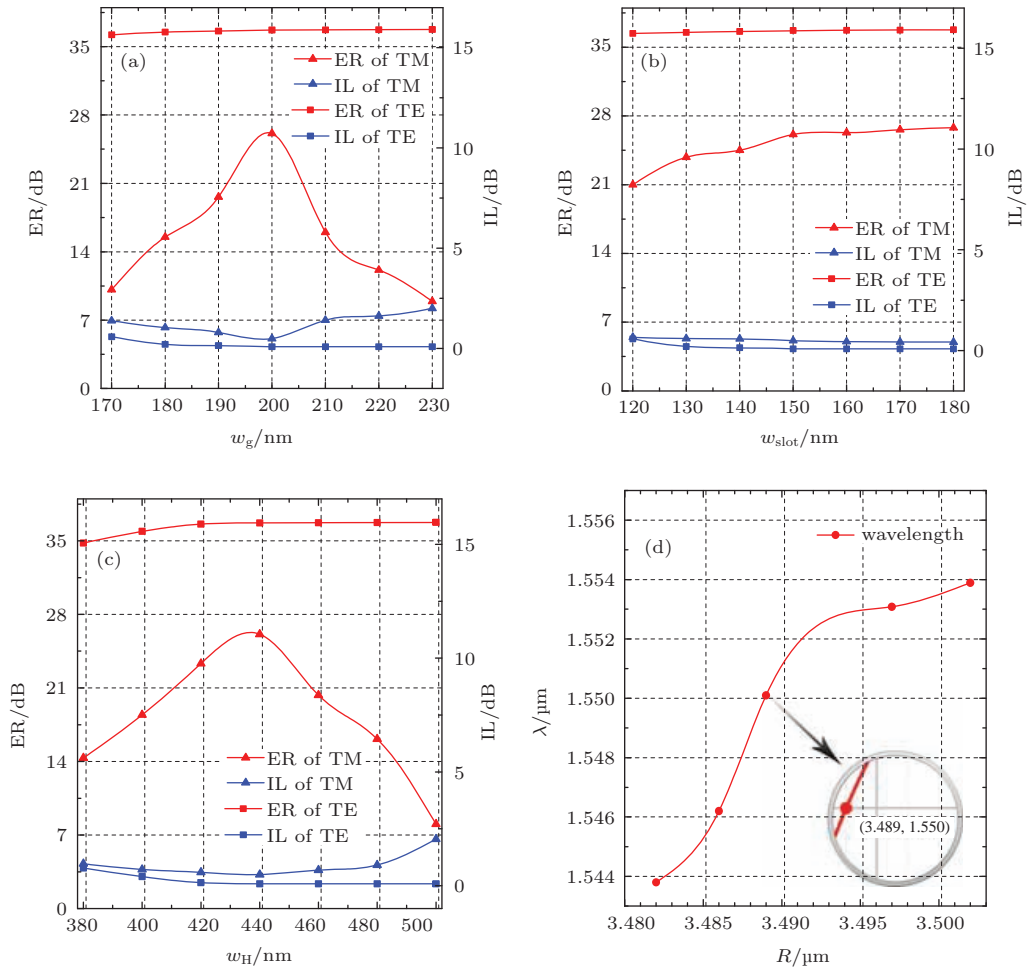


图 7 (网刊彩色) TM 与 TE 模 ER 与 IL 随 (a) w_g , (b) w_{slot} , (c) w_H 的变化关系; (d) 谐振波长 λ 随 R 的变化关系

Fig. 7. (color online) The ERs and ILs for the TM and TE modes as functions of (a) w_g , (b) w_{slot} , (c) w_H ; (d) resonant wavelength λ as a function of R .

为验证该 P-DEMUX 的有效性, 图 8 给出了 TE 模电场主分量 E_x 与 TM 模电场主分量 E_y 在其中随传输距离的演变情况, 其中 $R = 3.489 \mu\text{m}$, $w_H = 440$ nm, $w_r = 440$ nm, $w_g = 200$ nm, $w_{slot} = 150$ nm, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. 对于 TM 模, 输

入端口的模场耦合至微环中, 在特定波长下产生谐振效应, 从下路通道输出; 对于 TE 模, 两波导承载的模式差异明显, 输入端口的模场几乎可忽略微环, 从直通通道输出, 从而实现两偏振态的高效分离.

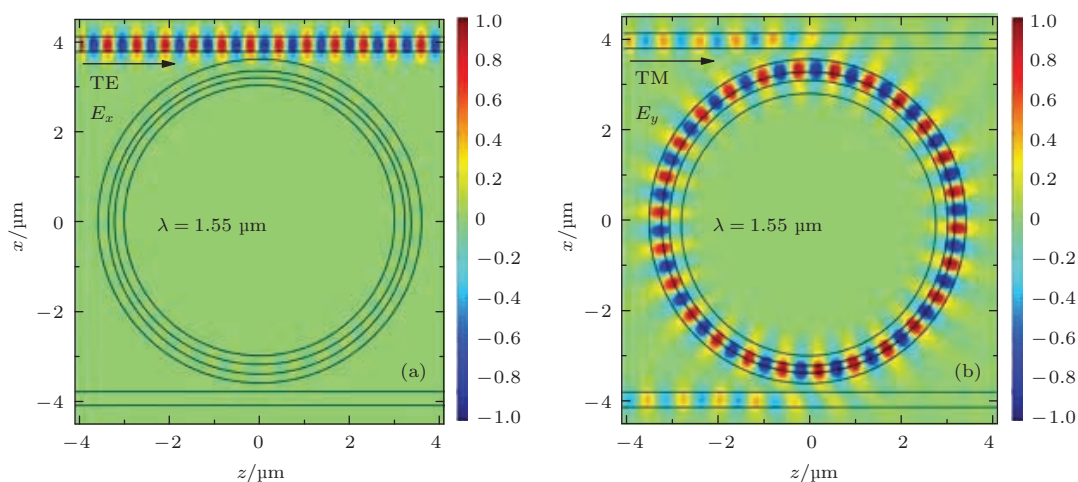


图8 (网刊彩色) P-DEMUX中(a) TE与(b) TM模电场主分量沿传输方向的演变

Fig. 8. (color online) Evolution of the major components for the (a) TE and (b) TM modes along the propagation distance through the designed P-DEMUX device.

4 结 论

提出了一种基于硅基槽式微环的P-DEMUX器件,用以实现基于微环WDM系统的偏振模式的有效分离(或复用).硅基波导作为输入/输出通道,槽式微环用于偏振态/波长选择组件.采用全矢量FDFD及3D-FDTD法分析了器件的模场与传输特性.通过优化设计,输入信号中TM模经过耦合及谐振效应后从下路通道输出,而TE模式从直通通道输出.当微环半径 $R = 3.489 \mu\text{m}$ 、工作波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 时,下路端口(TM模)与直通端口(TE模)的ER与IL分别为 ~ 26.12 (36.67) dB与 ~ 0.49 (0.09) dB.此外,论文详细研究了器件结构参数与其性能的变化关系,给出了关键参数的制作容差,最后给出了光场在P-DEMUX中沿传输方向的传输演变.该P-DEMUX具有结构紧凑、性能优良等特点,在微环型WDM系统加入偏振解复用有应用潜力.

参考文献

[1] Vlasov Y A 2012 *IEEE Commun. Mag.* **50** s67
 [2] Kopp C, Bernabe S, Bakir B B, Fedeli J M, Orobitchouk R F, Porte S H, Zimmermann L, Tekin T 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** 498
 [3] Liu A S, Liao L, Chetrit Y, Hat B N, Rubin D, Panicca M 2010 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **16** 23
 [4] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E 2013 *Nat. Photonics* **7** 354

[5] Deng L, Pang X D, Othman M B, Jensen J B, Zibar B, Yu X B, Liu D M, Monroy I T 2012 *Opt. Express* **20** 4369
 [6] Sjödin M, Agrell E, Johannisson P, Lu G W, Andrekson P A, Karlsson M 2011 *J. Lightwave Technol.* **29** 1219
 [7] Guan H, Novack A, Streshinsky M, Shi R, Fang Q, Lim A E J, Lo G Q, Tom B J, Hochberg M 2014 *Opt. Express* **22** 2489
 [8] Dai D X, Wang Z, Bowers J E 2011 *Opt. Letters* **36** 2590
 [9] Yu Y Y, Li X Y, Sun B, He K P 2015 *Chin. Phys. B* **24** 068702
 [10] Yang B K, Shin S Y, Zhang D M 2009 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **21** 432
 [11] Dai D X, Wang Z, Peters J, Bowers J E 2012 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **24** 673
 [12] Gerosa R M, Biazoli C R, Cordeiro C, Matos C 2012 *Opt. Express* **20** 28981
 [13] Ye W N, Xu D X, Janz S, Waldron P, Cheben P, Tarr N G 2007 *Opt. Letters* **32** 1492
 [14] Xiong F, Zhong W D, Kim H 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 2329
 [15] Xu Q F, Fattal D, Beausoleil R G 2008 *Opt. Express* **16** 4309
 [16] Guha B, Kyotoku B B C, Lipson M 2010 *Opt. Express* **18** 3487
 [17] Bogaerts W, DE H P, Van V T, De K V, Kumar S S, Claes T, Dumon P, Bienstman P, Van D T, Baeta R 2012 *Laser Photonics Rev.* **6** 47
 [18] Xiang X Y, Wang K R, Yuan J H, Jin B Y, Sang X Z, Yu C X 2014 *Chin. Phys. B* **23** 034206
 [19] Ding R, Liu Y, Li Q, Xuan Z, Ma Y J, Yang Y S, Lim A E J, Lo G Q, Bergman K, Baehr J T, Hochberg M 2014 *IEEE Photonics J.* **6** 1
 [20] Park S, Kim K J, Kim I G, Kim G 2011 *Opt. Express* **19** 13531
 [21] Cai X L, Huang D X, Zhang X L 2006 *Opt. Express* **14** 11304

- [22] Almeida V R, Xu Q F, Barrios C A, Lipson M 2004 *Opt. Letters* **29** 1209
- [23] Nacer S, Aissat A 2012 *Opt. Quantum Electron.* **44** 35
- [24] Xiao J B, Liu X, Sun X H 2008 *Jpn. J. Appl. Phys.* **47** 3748
- [25] Saitoh K, Koshiba M 2009 *Opt. Express* **17** 19225
- [26] Xu Y, Xiao J B, Sun X H 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 4282
- [27] Xu Y, Xiao J B, Sun X H 2015 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **27** 654
- [28] Xiao J B, Xu Y, Wang J Y, Sun X H 2014 *Appl. Opt.* **53** 2390
- [29] Ishizaka Y, Saitoh K, Koshiba M 2013 *IEEE Photonics J.* **5** 6601809
- [30] Berenger J P 1994 *J. Comput. Phys.* **114** 185
- [31] Xiao J B, Ni H X, Sun X H 2008 *Opt. Letters* **33** 1848
- [32] Okamoto K 2010 *Fundamentals of optical waveguides* (San Diego: Academic Press) pp159–203
- [33] Oskooi A F, Roundy D, Ibanescu M, Bermel P, Joannopoulos J D, Johnson S G 2010 *Comput. Phys. Commun.* **181** 687
- [34] Sullivan D M 2013 *Electromagnetic simulation using the FDTD method* (New York: Wiley) pp85–96
- [35] Chew W C, Liu Q H 1996 *J. Comput. Acoust.* **4** 341

Full-vectorial analysis of a polarization demultiplexer using a microring resonator with silicon-based slot waveguides*

Xiao Jin-Biao[†] Luo Hui Xu Yin Sun Xiao-Han

(School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(Received 23 April 2015; revised manuscript received 11 May 2015)

Abstract

Photonic integrated circuits (PICs) based on silicon-on-insulator (SOI) platform with the advantages of high-index-contrast and CMOS-compatible process can efficiently reduce the component sizes and densely integrate them at a chip scale. To meet the ever-increasing demand for the optical interconnect capacity, various multiplexing techniques have been used. However, it should still be proposed to effectively reduce the component size accompanied with the reasonable performance and wavelength division multiplexing (WDM) compatibility. To the best of our knowledge, there has no attempt so far to design a polarization demultiplexer based on a microring resonator in slot waveguide structures. In this paper, a compact silicon-based polarization demultiplexer is proposed, where two regular silicon-based waveguides are used as the input/output channels and a microring in slot waveguide structures is used as the polarization/wavelength-selective component. A full-vectorial finite-difference frequency-domain method is utilized to study the modal characteristics of the regular and slot silicon-based waveguides, where the effective indices and coupling for transverse magnetic (TM) and transverse electric (TE) modes are presented. With the unique modal characteristics of slot waveguides and the strong polarization-dependent features of microring resonator, we can show that the field distributions and the effective indices of the TM mode between the regular and slot waveguides are similar, while those of the TE mode show clearly different. As a result, the input TM mode outputs from the drop port at the resonant wavelength, while the input TE mode outputs from the through port directly with nearly neglected coupling, thus the two polarizations are separated efficiently. A three-dimensional finite-difference time-domain method is utilized to study the spectrum and transmission characteristics of the proposed device. From the results, a polarization demultiplexer with a radius of 3.489 μm is achieved with the extinction ratio and insertion loss of ~ 26.12 (36.67) dB and ~ 0.49 (0.09) dB respectively for the TM(TE) mode at the wavelength of 1.55 μm by carefully optimizing the key structural parameters. In addition, taking the fabrication errors into account during the practical process, the fabrication tolerances to the proposed device are analyzed in detail and the performance is assessed by the extinction ratio and insertion loss. For demonstrating the transmission characteristics of the designed polarization (de) multiplexing (P-DEMUX) device, the evolution along the propagation distance of the input mode through the designed P-DEMUX is also presented. The present polarization demultiplexer is compatible with the WDM systems on-chip based on microring resonators and can be easily introduced into the WDM system to further increase the optical interconnect capacity.

Keywords: polarization demultiplexer, slot waveguide, microring resonator, silicon photonics

PACS: 42.82.-m, 42.79.Gn

DOI: 10.7498/aps.64.194207

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60978005) and the Jiangsu Provincial Natural Science Foundation, China (Grant No. BK20141120).

[†] Corresponding author. E-mail: jbxiao@seu.edu.cn