

硅基槽式纳米线多模干涉型模阶数转换器全矢量分析

肖金标 王登峰

Full-vectorial analysis of a silicon-based multimode interference mode-order converter for slot waveguide nanowires

Xiao Jin-Biao Wang Deng-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 074203 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.074203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单片集成放大反馈激光器的脉冲包络动力学实验研究

Experimental investigations on the dynamical characteristics of pulse packages in a monolithically integrated amplified feedback laser

物理学报.2016, 65(21): 214209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214209>

硅基光源的研究进展

Research progress of silicon light source

物理学报.2015, 64(20): 204208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204208>

硅基槽式微环谐振腔型偏振解复用器全矢量分析

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

物理学报.2015, 64(19): 194207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194207>

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>

# 硅基槽式纳米线多模干涉型模阶数转换器 全矢量分析\*

肖金标<sup>†</sup> 王登峰

(东南大学电子科学与工程学院, 南京 210096)

(2016年9月8日收到; 2017年1月13日收到修改稿)

提出了一种基于硅基槽式纳米线结构的紧凑式  $1 \times 2$  多模干涉器型模阶数转换器, 其中输入/输出通道为槽式直波导, 经线性锥形过渡器连接居于中心的二次锥形槽式多模波导. 采用全矢量频域有限差分法详细分析了垂直槽波导的模式特性, 选取电场主分量  $E_y$  得到增强的 quasi-TM 模作为转换器的光信号模式. 对比分析了矩形结构与二次锥形结构中的周期自镜像效应, 发现二次锥形结构尺寸更短、损耗更低的特点. 根据自镜像效应中一阶模成像位置设计多模干涉区域长度, 经线性锥形过渡器从较宽输出端口输出一阶模, 从较窄输出端口输出基模, 从而实现模阶数转换功能. 采用三维有限时域差分法详细分析了该转换器的光波传输特性, 详细讨论了器件关键结构参数的制作容差. 参数优化结果表明, 该转换器的多模干涉区域的尺寸为  $3 \times 5 \mu\text{m}^2$  时, 在  $1.55 \mu\text{m}$  工作波长下, quasi-TM 基模在输出 quasi-TM 一阶模端口的插入损耗约为 0.35 dB, 输出波导间的串扰约为  $-16.9$  dB. 另外, 给出了输入模场主分量在器件中的传输演变情况.

**关键词:** 模阶数转换器, 多模干涉, 槽波导, 硅光子学

**PACS:** 42.82.-m, 42.79.Gn

**DOI:** 10.7498/aps.66.074203

## 1 引言

硅基光子集成技术具有成本低廉、工艺成熟、与互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 兼容等优点<sup>[1-3]</sup>, 在通信窗口 ( $1.3-1.6 \mu\text{m}$  波长) 透明, 能够减小传输损耗. 另外, 硅的高折射率与高热导率特点使器件能够小型化, 利于光子器件高密集集成. 利用硅基光波导集成的光子器件, 如光调制器、光放大器、光开关等, 在光通信与集成光路领域具有广阔的应用前景. 另一方面, 为了满足日益增长的网络传输速率的需求, 各类复用技术, 如波分复用 (WDM)<sup>[4]</sup>、偏振复用 (PDM)<sup>[5,6]</sup> 及模分复用 (MDM)<sup>[7,8]</sup> 被应用于扩大信道容量, 在片上传输系统中也有着广泛应用. 其中, MDM 作为空分复用技术 (SDM)<sup>[9]</sup>

的一种, 在光波导中支持多个模式以提高传输容量. MDM 系统具有结构简单、非线性效应小等特点, 由于其多模波导结构导致的尺寸较大的特点, 降低了 MDM 系统的集成度. 另外, 多模传输过程中的模式畸变、模式串扰以及模阶数转换过程中的转换效率等问题制约着 MDM 技术的发展. 因此, 模阶数转换器 (mode order converter, MOC) 模阶数转换作为 MDM 系统的核心技术, 实现高低阶模之间的相互转换功能, 受到广泛的关注. 光纤型 MOC 主要采用机械压力光栅<sup>[10]</sup>、长周期光纤布拉格光栅<sup>[11]</sup>、相位板等<sup>[12]</sup> 结构, 波导型 MOC 主要采用 Y 型分支波导结构<sup>[13,14]</sup> 与多模干涉 (multimode interference, MMI) 耦合器结构<sup>[15,16]</sup>. 为了满足集成化、小型化的发展趋势, 需要提出新型 MOC 结构以解决传统 MOC 尺寸偏大、转换效率低等问题.

多模干涉耦合器<sup>[17]</sup> 以其结构简单、低插入损

\* 国家自然科学基金 (批准号:11574046, 60978005) 和江苏省自然科学基金 (批准号: BK20141120) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: jbxiao@seu.edu.cn

耗、高带宽、高容差性及偏振不敏感等优点, 被应用于光开关<sup>[18]</sup>、光功分器<sup>[19]</sup>、波长波分复用器<sup>[20]</sup>、阵列波导光栅复用器/解复用器<sup>[21]</sup>之中. 2008年, Yan<sup>[22]</sup>提出了一种基于Si/SiO<sub>2</sub>脊波导结构的2×2多模干涉型MOC, MMI区域的尺寸为20×829 μm<sup>2</sup>、工作波长在1.3 μm时, 转换效率为65.7%, 并获得了较为理想的基模转一阶模的模阶数转换性能. 但是, 该器件基于Si衬底的脊波导结构, 其尺寸偏大, 不利于实现片上光子器件高密度集成. 近年来, 硅基槽式波导<sup>[23,24]</sup>因其独特的模式特性及纳米级尺寸特点, 受到国内外研究人员的广泛关注. 目前, 基于硅基槽波导结构的MMI型MOC, 国内外鲜有文献报道.

本文提出一种基于硅基槽式纳米线结构的紧凑式1×2多模干涉器型模阶数转换器, 其中输入/输出通道为槽式直波导, 经线性锥形过渡器连接居于中心的二次锥形槽式多模波导. 根据垂直槽波导中电场分量 $E_x$ 与 $E_y$ 模场的差异以及矩形结构与二次锥形结构的自镜像效应<sup>[25,26]</sup>特征, 确定一阶模成像位置, 优化设计出二次锥形MMI结构, 最终经线性锥形过渡器从较宽端口输出一阶模, 从而实现模阶数转换功能. 该硅基MMI型MOC可以与WDM片上系统完全兼容<sup>[27]</sup>, 实现MDM与WDM混合传输, 从而提高片上集成光路的传输容量, 并与CMOS工艺兼容. 采用全矢量频域/时域有限差分法优化设计, 结果表明当MMI区域尺寸为3×5 μm<sup>2</sup>, 工作波长为1.55 μm时, quasi-TM基模在输出一阶模端口的插入损耗约为0.35 dB, 输出波导间串扰约为-16.9 dB. 另外, 本文详细分析了器件关键结构参数的制作容差, 并给出电场主分量在器件中沿传输方向的演变情况.

## 2 理论数值方法

本文采用频域有限差分法(FDFD)<sup>[28-30]</sup>进行槽波导的模式分析. FDFD本质上是采用倒置矩阵求解线性系统, 对特定波长计算速度快且稳定. 选用三维时域有限差分法(3D-FDTD)<sup>[31,32]</sup>进行光波传输特性分析, 优化器件的关键参数及其制作容差.

频域有限差分全矢量矩阵由麦克斯韦方程组利用Yee网格划分后进行公式推导得出, 经过差分

化与消减 $E_z, H_z$ 分量后, 电场分量 $E_x$ 形式如下:

$$\begin{aligned} & \frac{\beta}{k_0} E_x(i, j) \\ &= -\frac{1}{k_0^2 \varepsilon_{zz} h_x h_y} [H_x(i, j-1) - H_x(i+1, j-1) \\ & \quad - H_x(i, j) + H_x(i+1, j)] + \frac{1}{k_0^2 \varepsilon_{zz} h_x^2} H_y(i-1, j) \\ & \quad + \left(1 - \frac{2}{k_0^2 \varepsilon_{zz} h_x^2}\right) H_y(i, j) \\ & \quad + \frac{1}{k_0^2 \varepsilon_{zz} h_x^2} H_y(i+1, j). \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\beta$ 为传播常数;  $k_0$ 为真空中波数;  $\varepsilon_{zz}$ 为介电常数;  $h_x, h_y$ 分别为 $x$ 与 $y$ 方向上网格数;  $E_x(H_x), E_y(H_y)$ 为电场(磁场)横向分量. 参数细节可参阅文献<sup>[30]</sup>. 结合边界条件, (1)式可约化为如下本征值方程:

$$[\mathbf{A}] \cdot \{x\} = \lambda [\mathbf{B}] \cdot \{x\}, \quad (2)$$

式中 $[\mathbf{A}]$ 为(1)式中的系数矩阵;  $\lambda = \beta/k_0$ , 其中 $\beta$ 为传播常数,  $k_0$ 为自由真空波数;  $\{x\} = \{E_x, E_y, H_x, H_y\}^T$ ;  $[\mathbf{B}]$ 为单位矩阵. 利用电磁场的纵横关系, (2)式可约化为关于横向电场( $E_x, E_y$ )或横向磁场( $H_x, H_y$ )方程, 减小导出矩阵阶数, 提高计算效率.

与FDTD采用矩阵求逆运算在频域求解电磁场问题不同, 有限时域差分法(FDTD)<sup>[33,34]</sup>在时域上采用迭代方法求解电磁场问题. 引入完善匹配层(PML)<sup>[35]</sup>吸收边界条件, 以FDFD计算出的本征模作为初始激励, FDTD能够分析大多数电磁场问题, 如传输、反射、散射等特性, 具体表达式可参考文献<sup>[36]</sup>. 本文采用FDTD模拟分析模场在MOC中的传输演变情况, 优化器件结构, 给出关键参数的制作容差.

## 3 器件结构与原理

图1(a)和图1(b)分别给出了MOC三维结构及MMI区域截面(虚线)示意图, 槽式多模干涉耦合器居中, 采用二次锥形结构, 三条槽式直波导及三条槽式线性锥形波导分别组成输入/输出通道与输入/输出连接器, 其中 $L_{\text{MMI}}$ 为MMI区长度,  $W_{\text{MMI}}$ 为MMI区宽度. 输入端口(input port)、输出端口1(output port1)、输出端口2(output port2)分别表示信号传输的输入与输出接口. 输入连接器

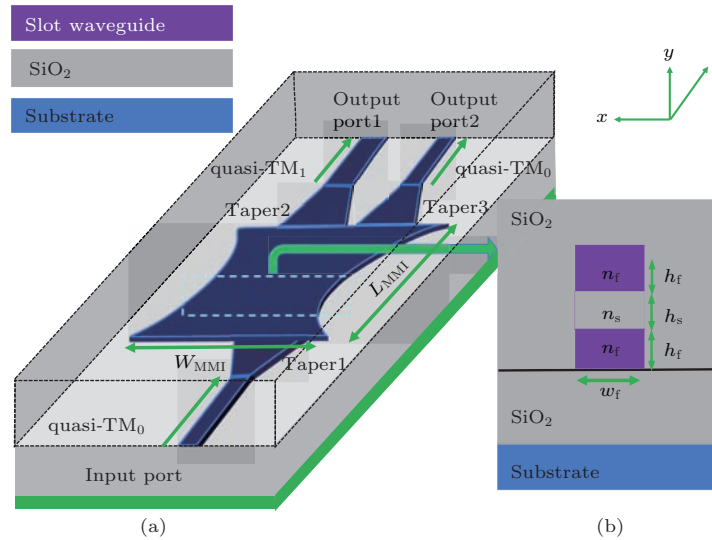


图1 (网刊彩色) (a) MOC结构示意图; (b) MMI区域截面示意图

Fig. 1 (color online) (a) Schematic layout of the proposed MOC and (b) its cross-section of the MMI section.

(taper1)、输出连接器1 (taper2)、输出连接器2 (taper3) 分别表示输入/输出端口与MMI区的连接器。Quasi-TM基模由输入端口经输入连接器进入MMI区域, 激发产生高阶模, 各阶模之间相互干涉产生自镜像效应, 由此确定一阶模成像位置, 将quasi-TM一阶模从较宽输出端口1输出, 将quasi-TM基模从较窄输出端口2输出。经过优化设计, 使quasi-TM基模转换为一阶模的光功率尽可能高, 从而提高转换效率。

在以下分析中, 如无特别指明, 计算结构参数为: 二氧化硅(SiO<sub>2</sub>) 折射率为1.46, 上/下包层材料硅(Si) 折射率  $n_f = 3.48$ , 槽区折射率  $n_s = 1.58$ , 硅层厚度  $h_f = 200$  nm, 槽厚  $h_s = 50$  nm,  $w_f$  表示槽波导宽度, 如图1(b)所示, 器件工作在波长  $\lambda = 1.55$   $\mu\text{m}$ , 光场的传输方向如图1(a)所示。可以看出该MOC有结构简单、尺寸紧凑的优点。

#### 4 数值结果与讨论

首先采用FDFD法分析垂直槽波模式特性, 以确定单模/多模槽波导宽度及光信号偏振态。图2给出了槽波导quasi-TM基模及一阶模电场分量  $E_x$  与  $E_y$  的模场分布。从图2(a)和图2(b)可以看出, 电场分量  $E_y$  能量集中分布在低折射率槽区且在垂直方向不连续。图2(c)和图2(d)为一阶模的模场分布, 在更宽的槽波导内形成稳定的传输模式。

为满足电通量密度  $D$  连续的边界条件 ( $D = n^2 E$ ,  $n$  为材料的折射率), 导致  $E_y$  分量 (quasi-TM模的电场主分量) 不连续, 在低折射率区边界附近电场以比例  $n_f^2/n_s^2$  增强, 对于Si-SiO<sub>2</sub> 高折射率分布差材料系, 电场增强相当明显, 在图2中可以明显看出, 槽波导结构对quasi-TM模在低折射率的槽区得到了很好地限制。而quasi-TE模式的电场分布 (限于篇幅, 没有给出) 与常规硅基波导类似, 分布在整个硅层。因此, 选取电场强度在垂直槽波导结构中得到增强的quasi-TM模作为本文设计的转换器的光信号模式。

图3(a)为硅基槽波导模式有效折射率随波导宽度的变化关系曲线。可以看出, 当波导宽度  $w_f$  从250 nm增加至725 nm时, quasi-TM<sub>0</sub> 与 quasi-TM<sub>1</sub> 有效折射率  $n_{\text{eff}}$  呈单调递增趋势。当  $w_f < 500$  nm时, 槽波导只能承载基模, 实现单模传输; 当  $w_f > 500$  nm时, 槽波导将允许一阶模的传输。图3(b)给出了槽波导槽宽  $h_s$  的增加引起quasi-TM<sub>0</sub> 与 quasi-TM<sub>1</sub> 的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的变化情况。可以看出随着  $h_s$  的增加, quasi-TM基模与一阶模的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  均呈单调递减趋势, 并且  $h_s$  的变化不易引起模式的截止情况。当  $w_f = 400$  nm,  $h_s = 50$  nm时, 槽波导可承载基模, 可作为输入/输出quasi-TM<sub>0</sub> 模的波导的尺寸。当  $w_f = 1000$  nm,  $h_s = 50$  nm时, 槽波导可承载一阶模, 可作为输出quasi-TM<sub>1</sub> 模的波导的尺寸。通过FDFD法分析, MMI区域的宽度  $W_{\text{MMI}} = 2$   $\mu\text{m}$ 时, 可容纳五阶模

以上的高阶模, 能够产生理想的多模干涉效应(自镜像效应). quasi-TM 基模从输入端口入射, 进入

MMI 区域中形成多模干涉效应, 分别从输出端口输出一阶模或基模.

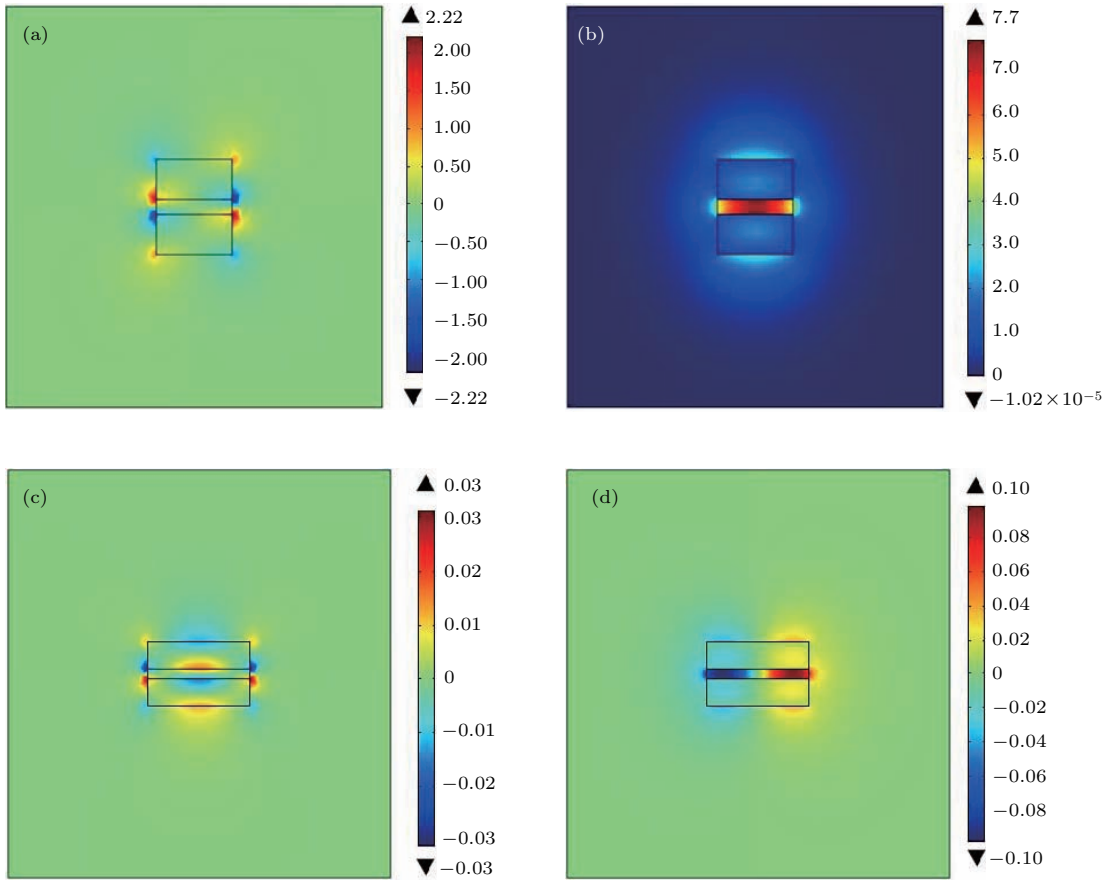


图2 (网刊彩色) Quasi-TM 基模 (a)  $E_x$  与 (b)  $E_y$  分量模场分布; 一阶模 (c)  $E_x$  与 (d)  $E_y$  分量模场分布  
Fig. 2. (color online) Field distributions of the (a)  $E_x$  and (b)  $E_y$  components for the quasi-TM fundamental mode, and (c)  $E_x$  and (d)  $E_y$  components for the first-order mode.

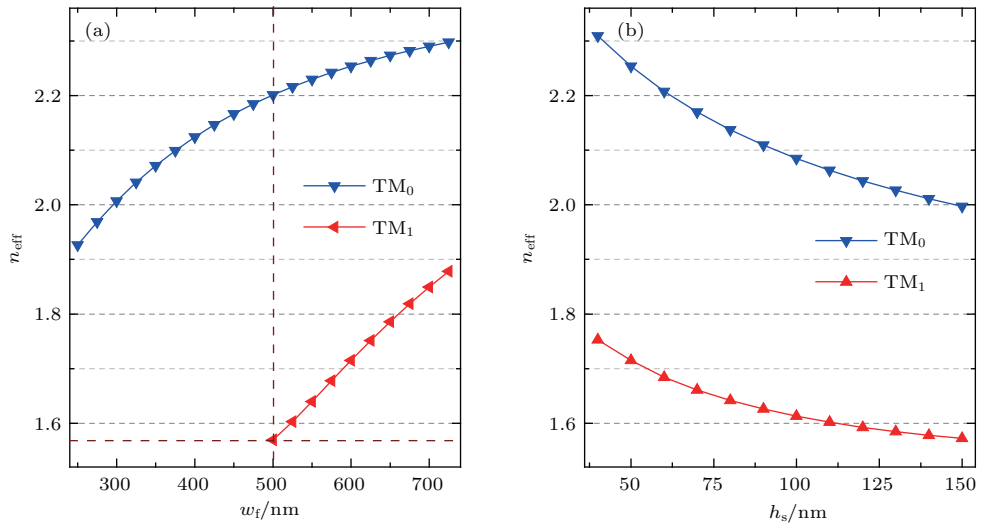


图3 (网刊彩色) 模式有效折射率  $n_{\text{eff}}$  随 (a)  $w_f$  (b)  $h_s$  的变化关系  
Fig. 3. (color online) Effective indices of the guided-modes as functions of (a)  $w_f$  and (b)  $h_s$ .



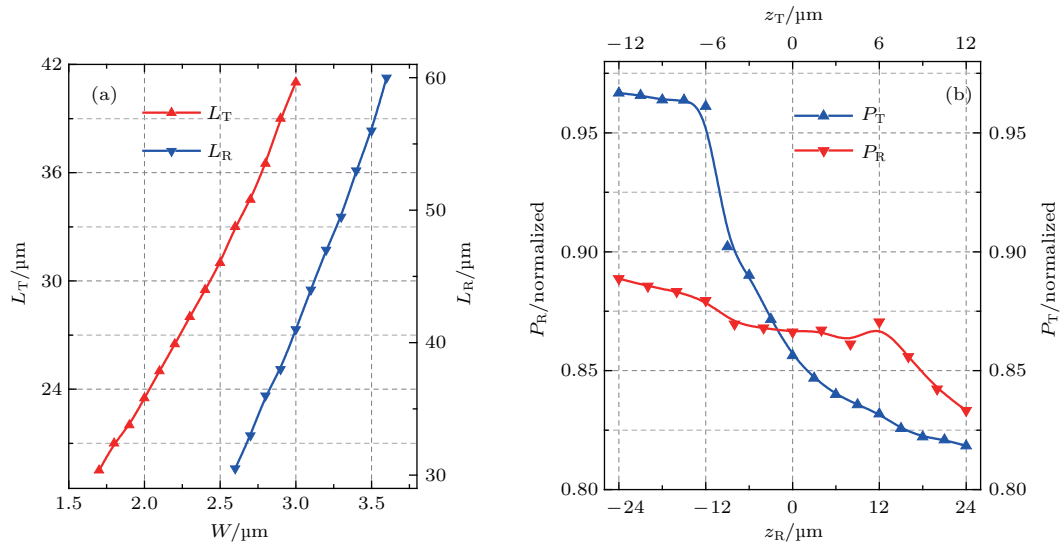


图4 (网刊彩色) (a)  $L_T$  ( $L_R$ ) 随  $W_0$  ( $W_{\text{MMI}}$ ) 的变化; (b)  $P_T$  ( $P_R$ ) 随传输距离  $Z_T$  ( $Z_R$ ) 的变化  
 Fig. 4. (color online) (a) Variation of the  $L_T$  ( $L_R$ ) with the  $W_0$  ( $W_{\text{MMI}}$ ) and (b) variation of the  $P_T$  ( $P_R$ ) with the  $Z_T$  ( $Z_R$ ).

作为核心部件的MMI区域通常采用矩形结构设计, 而本文采用二次锥形结构, 宽度函数  $W_{\text{MMI}}(z) = W_0 + A \times z^2$ , 其中  $W_0$  为二次锥形波导最窄处的宽度(即锥形波导  $z = 0$  处),  $A$  为结构系数, 决定二次锥形结构的弯曲程度, 由中心宽度  $W_0$  ( $z = 0$  处)、两端宽度  $W_i$  ( $z = \pm L_{\text{MMI}}/2$  处), MMI区域长度  $L_{\text{MMI}}$  共同决定. 图4(a)给出了随着二次锥形结构中心宽度  $W_0$  增加, 电场主分量  $E_y$  在一个周期的自镜像效应长度  $L_T$  的变化情况, 其中  $W_i = 3 \mu\text{m}$ . 同时, 图4(a)也给出了矩形结构MMI区域宽度  $W_{\text{MMI}}$  增加时, 一个周期自镜像效应长度  $L_R$  的变化情况. 从图4(a)中可以看出,  $W_0$  增大时,  $L_T$  增加. 同样, 矩形结构的  $L_R$  随着  $W_{\text{MMI}}$  的增加而增加. 因此, 对于矩形MMI结构, 减小中心宽度  $W_0$ , 形成如本文的二次锥形结构, 可有效减小MMI长度, 获得紧凑器件. 图4(b)给出了常规矩形波导中自镜像效应的功率衰减曲线, 其中  $P_R$ ,  $Z_R$  分别为矩形波导内传输光的归一化功率与传输距离, 其中  $W_{\text{MMI}} = 3 \mu\text{m}$ . 从曲线  $P_R$  剧烈的下降趋势看出, 矩形结构的自镜像效应在传输过程中易产生明显的损耗. 同时也给出了二次锥形波导中自镜像效应的功率  $P_T$  随传输距离  $Z_T$  的变化趋势, 其中  $W_0 = 2 \mu\text{m}$ ,  $W_i = 3 \mu\text{m}$ ,  $A = 0.00347$ . 可以看出, 二次锥形波导自镜像效应损耗更低, 衰功率减更加缓慢. 通过对比图4(b)的两条曲线, 发现矩形的MMI区域长度  $L_{\text{MMI}}$  大于约1/4周期的自成像

长度时, 光模传输将产生明显的传输损耗. 因此, 二次锥形结构可有效减小MMI区域的长度, 从而能减少传输损耗, 提高转换效率. 由于得到了FDTD模拟二次锥形MMI区域的自镜像效应, 可以从  $E_y$  模场分布中一阶模的成像位置, 确定MMI区域的长度  $L_{\text{MMI}} \approx 5 \mu\text{m}$ , 同时也根据图4所选定结构参数调整二次锥形结构的参数初值:  $W_i = 3.1 \mu\text{m}$ ,  $W_0 = 2 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{MMI}} = 5 \mu\text{m}$ , 系数  $A = 0.088$ . 初步模拟结果表明, 所选结构参数符合转换器的功能要求. 与  $1 \times 2$  型 3 dB 功分器不同, 模阶数转换器的输入波导的位置并不在MMI区域输入端居中处, 而在于MMI区域输入端约  $1/3W_i$  ( $x = -0.55$ ) 处. 在本文中, 我们将输出 quasi-TM<sub>1</sub> 模的波导称之为输出波导1, 将输出 quasi-TM<sub>0</sub> 模的波导称之为输出波导2, 因此经过FDTD模拟电场分量  $E_y$  在MMI区域的分布, 确定一阶模成像位置位于MMI区域输出端的约  $1/2W_i$  处(即输出波导1的位置  $x = 0$ ), 而基模因其分布均匀且要求对一阶模影响尽量小, 所以将其放置在MMI区域输出端的约  $1/10W_i$  处(即输出波导2的位置  $x = 1.2$ ). 经过仿真分析, 输出波导2缺失与否不会对输出端口1的输出模式造成干扰. 而且在今后的研究中, 通过对输出波导1与输出波导2及MMI区域的设计, 两个输出端口均可实现模阶数转换功能以及其功率分配比可调节, 这将实现MOC更多的功能.

采用3D-FDTD法分析本文所设计的MOC的

光波传输特性, 继而优化设计参数, 获得关键参数的制作容差. 在以下分析中, 主要考虑插入损耗  $L$  与串扰  $C$  两个性能参数, 分别定义为如下 [37,38]:

$$L = -10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_i} \right), \quad (3)$$

$$C = 10 \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right), \quad (4)$$

式中  $P_i$  为输入端口中 quasi-TM<sub>0</sub> 模的功率,  $P_1$  为

输出端口 1 中 quasi-TM<sub>1</sub> 模的功率,  $P_2$  为输出端口 2 中 quasi-TM<sub>0</sub> 模的功率. 其中, 输出端口 1 可承载基模与一阶模, 根据设计, 经锥形 MMI 输出进入端口 1 的模式为该波导的 quasi-TM<sub>1</sub> 模 (一阶本征模), 故基模基本不激发, 可忽略不计. 同时, 输出端口 2 为单模波导, 只能承载基模, 从而避免了输出端口多模串扰的发生.

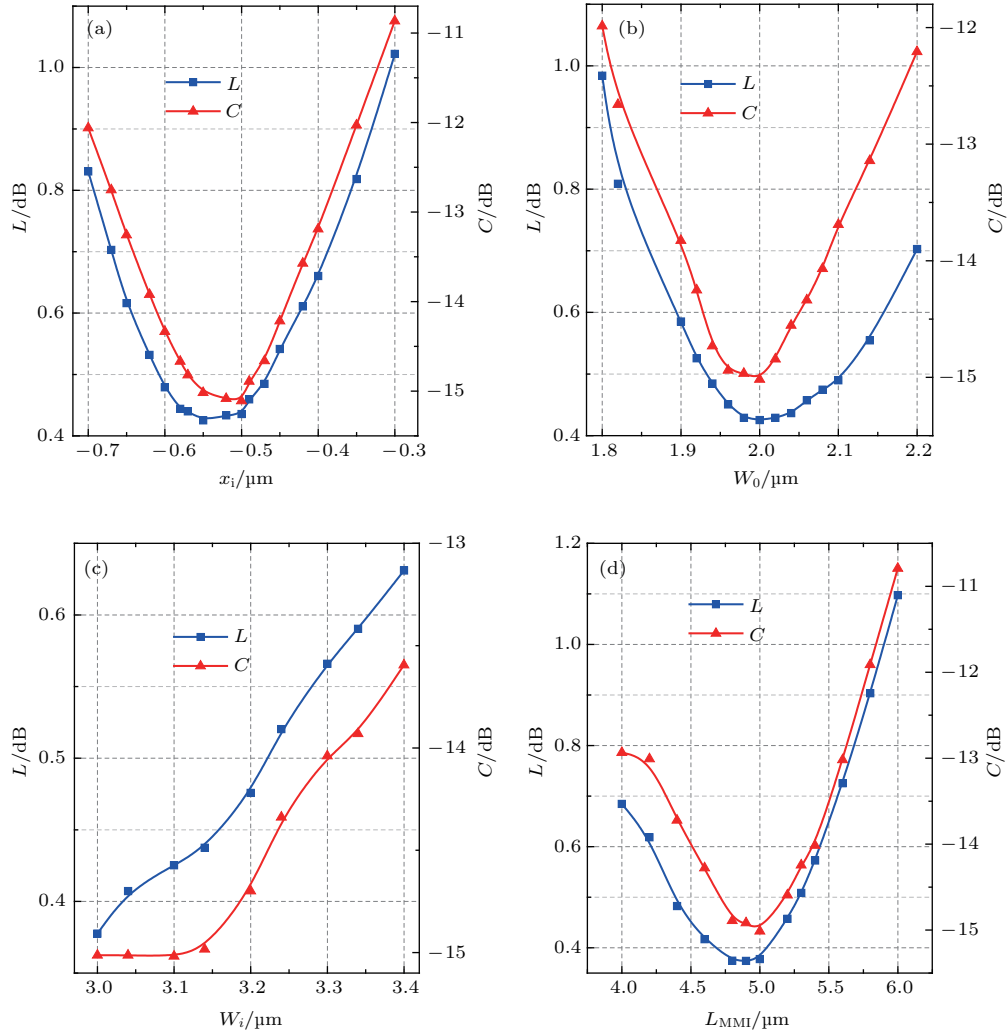


图5 (网刊彩色) 插入损耗  $L$  与串扰  $C$  随 (a) 输入波导位置  $x_i$ , (b) MMI 区域的中心宽度  $W_0$ , (c) MMI 区域两端宽度  $W_i$ , (d) MMI 区域长度  $L_{\text{MMI}}$  的变化关系

Fig. 5. (color online) The insertion cross  $L$  and crosstalk  $C$  as functions of (a) the position  $x_i$  of the input waveguide, (b) the central width  $W_0$  of MMI section, (c) the width  $W_i$  of both ends of MMI section, (d) the length  $L_{\text{MMI}}$  of MMI section.

图 5(a) 示出了输入波导位置  $x_i$  的变化对插入损耗  $L$  与串扰  $C$  的影响, 其中  $W_0 = 2 \mu\text{m}$ ,  $W_i = 3.1 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{MMI}} = 5 \mu\text{m}$ ,  $\delta = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{taper}} = 3 \mu\text{m}$ . 从图中可以看出,  $L$  与  $C$  随输入波导位置  $x_i$  的增加, 呈先降后增趋势, 当  $x_i = -0.55 \mu\text{m}$  时,  $L$  最小

约为 0.425 dB,  $C$  约为  $-15.018$  dB, 因此确定  $x_i$  的最优值为  $-0.55 \mu\text{m}$ . 同时可以得到, 输入波导位置  $x_i$  在  $-0.6 \mu\text{m}$  至  $-0.47 \mu\text{m}$  范围内,  $L$  小于 0.5 dB,  $C$  小于  $-15$  dB. 图 5(b) 所示为随着 MMI 区域的中心宽度  $W_0$  的增加,  $L$  与  $C$  先减小后增加的趋势,

其中  $x_i = -0.55 \mu\text{m}$ ,  $W_i = 3.1 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{MMI}} = 5 \mu\text{m}$ ,  $\delta = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{taper}} = 3 \mu\text{m}$ . 由图可知,  $W_0$  的最优值为  $2 \mu\text{m}$ , 此时  $L$  最小约为  $0.425 \text{ dB}$ ,  $C$  最小约为  $-15.018 \text{ dB}$ . 可以得到  $W_0$  的容差性: 偏离值在  $-60 \text{ nm}$  至  $100 \text{ nm}$  范围内,  $L$  小于  $0.5 \text{ dB}$ ,  $C$  小于  $-14 \text{ dB}$ . 图 5(c) 给出了插入损耗  $L$  与串扰  $C$  随 MMI 区域的两端宽度  $W_i$  的变化关系, 其中  $x_i = -0.55 \mu\text{m}$ ,  $W_0 = 2 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{MMI}} = 5 \mu\text{m}$ ,  $\delta = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{taper}} = 3 \mu\text{m}$ . 可以看出  $W_i$  增加的过程中,  $L$  与  $C$  呈单调增加趋势, 因此可以确定  $W_i$  最优值为  $3 \mu\text{m}$ , 此时  $L$  最小约为  $0.378 \text{ dB}$ ,  $C$  最小约

为  $-15.013 \text{ dB}$ .  $W_i$  偏离值在  $0 \text{ nm}$  至  $200 \text{ nm}$  范围内, 其  $L$  可以小于  $0.5 \text{ dB}$ ,  $C$  小于  $-14.5 \text{ dB}$ . 图 5(d) 给出了插入损耗  $L$  与串扰  $C$  与 MMI 长度  $L_{\text{MMI}}$  的关系曲线, 其中  $x_i = -0.55 \mu\text{m}$ ,  $W_0 = 2 \mu\text{m}$ ,  $W_i = 3 \mu\text{m}$ ,  $\delta = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{taper}} = 3 \mu\text{m}$ . 从图中可见, 随着  $L_{\text{MMI}}$  增加,  $L$  与  $C$  呈先减小后增加的趋势. 由此可以看出,  $L_{\text{MMI}}$  最优值为  $5 \mu\text{m}$ , 此时  $L$  约为  $0.378 \text{ dB}$ ,  $C$  约为  $-15.013 \text{ dB}$ . MMI 区域长度的容差性: 偏离值在  $-600 \text{ nm}$  至  $300 \text{ nm}$  内, 能够低至  $0.5 \text{ dB}$  插入损耗,  $-14 \text{ dB}$  串扰.

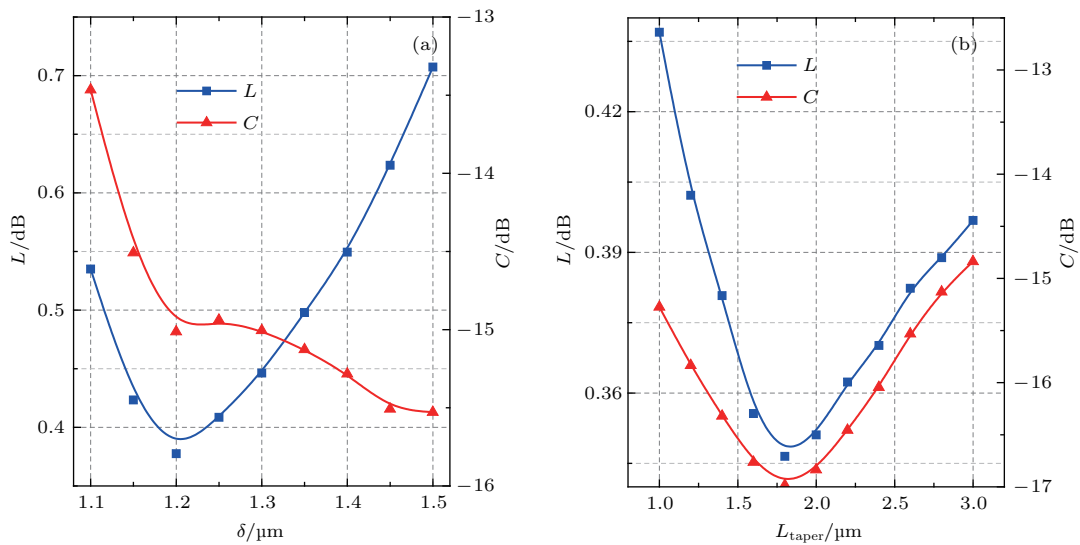


图 6 (网刊彩色) 插入损耗  $L$  与串扰  $C$  与 (a) 输出波导间距  $\delta$  及 (b) 锥形波导长度  $L_{\text{taper}}$  变化关系  
 Fig. 6. (color online) Insertion cross  $L$  and crosstalk  $C$  as functions of (a) the gap  $\delta$  between output waveguides and (b) the length  $L_{\text{taper}}$  of taper waveguide.

为了减小插入损耗并提高器件的容差性, 在输入/输出波导与 MMI 区域之间采用线性锥形波导连接器, 如图 1 所示. 锥形波导 1 (taper1) 的宽度由与输入波导相等的宽度  $400 \text{ nm}$  增加至  $1200 \text{ nm}$ , 长度为  $1 \mu\text{m}$ . 锥形波导 2 (taper2) 的宽度由  $1.6 \mu\text{m}$  减小至  $1 \mu\text{m}$ , 为了使锥形波导的耦合效率达到  $90\%$  以上, 其长度设计为  $3 \mu\text{m}$ . 同样, 锥形波导 3 (taper3) 的宽度由  $600 \text{ nm}$  减小至  $400 \text{ nm}$ , 其长度设计为  $3 \mu\text{m}$ . 图 6(a) 给出了输出波导间距  $\delta$  与插入损耗  $L$ 、串扰  $C$  的关系曲线, 其中  $x_i = -0.55 \mu\text{m}$ ,  $W_0 = 2 \mu\text{m}$ ,  $W_i = 3 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{MMI}} = 5 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{taper}} = 3 \mu\text{m}$ . 图中,  $C$  随着间距  $\delta$  的增加一直呈减小趋势, 但  $\delta$  从  $1.2 \mu\text{m}$  增加至  $1.5 \mu\text{m}$ ,  $C$  只减小了  $0.5 \text{ dB}$ ; 而插入损耗  $L$  随

着  $\delta$  的增加呈先减小后增加的趋势. 因此, 根据  $L$  的变化, 选定波导间距  $\delta$  最优值为  $1.2 \mu\text{m}$ .  $\delta$  的容差性: 偏离值为  $-50 \text{ nm}$  至  $150 \text{ nm}$  时,  $L$  小于  $0.5 \text{ dB}$ ,  $C$  小于  $-14.5 \text{ dB}$ . 由此可见, 输入锥形波导连接器长度不会引起插入损耗  $L$  显著变化. 在图 6(b) 给出了不同输出锥形波导长度  $L_{\text{taper}}$  与对应的插入损耗  $L$ 、串扰  $C$  的关系曲线, 其中  $x_i = -0.55 \mu\text{m}$ ,  $W_0 = 2 \mu\text{m}$ ,  $W_i = 3 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{MMI}} = 5 \mu\text{m}$ ,  $\delta = 1.2 \mu\text{m}$ . 可以看出,  $L$  与  $C$  随着  $L_{\text{taper}}$  的增加呈先减小后增加的变化. 因此, 可以确定锥形波导长度  $L_{\text{taper}}$  的最优值为  $1.8 \mu\text{m}$ , 此时的  $L$  为  $0.346 \text{ dB}$ ,  $C$  为  $-16.9 \text{ dB}$ .  $L_{\text{taper}}$  偏离值在  $-600 \text{ nm}$  至  $+1200 \text{ nm}$  范围内,  $L$  小于  $0.4 \text{ dB}$ ,  $C$  小于  $-15 \text{ dB}$ , 有很好的容差性.



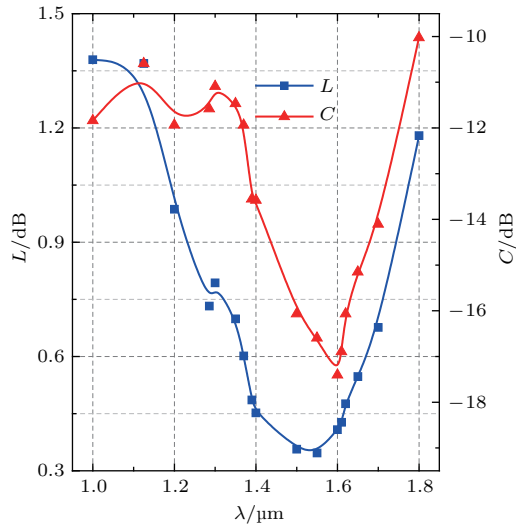


图7 (网刊彩色) 插入损耗  $L$  与串扰  $C$  随工作波长  $\lambda$  的变化

Fig. 7. (color online) Insertion Loss  $L$  and crosstalk  $C$  as a function of the wavelength.

带宽是光波导器件需要考察的常规参数之一, 光通信器件通常需要在一定波段内工作, 并要求其

波长相关损耗小, 为此对整个模阶数转换器进行了从 1000—1800 nm 波段的扫描, 其结果如图 7 所示, 其中  $x_i = -0.55 \mu\text{m}$ ,  $W_0 = 2 \mu\text{m}$ ,  $W_i = 3 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{MMI}} = 5 \mu\text{m}$ ,  $\delta = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{taper}} = 1.8 \mu\text{m}$ . 从图中可以看出随着工作波长的增加, 插入损耗  $L$  与串扰  $C$  呈先降低后增加的趋势, 因此得到插入损耗  $L$  为 0.48 dB 内的带宽为 230 nm.

经过优化设计后的模阶数转换器, 采用 3D-FDTD 模拟仿真光波在其中的传输演变情况, 得到如图 8 所示的 quasi-TM 模电场主分量  $E_y$  分布图, 其中  $x_i = -0.55 \mu\text{m}$ ,  $W_0 = 2 \mu\text{m}$ ,  $W_i = 3 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{MMI}} = 5 \mu\text{m}$ ,  $\delta = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{taper}} = 1.8 \mu\text{m}$ . 从图中可以看出, 入射光 quasi-TM<sub>0</sub> 模在通过 MMI 区域时出现多模干涉现象并产生高阶模, 然后从输出波导 1 输出 quasi-TM<sub>1</sub> 模, 从输出波导 2 输出 quasi-TM<sub>0</sub> 模, 实现 quasi-TM<sub>0</sub> 模转换为 quasi-TM<sub>1</sub> 模功能.

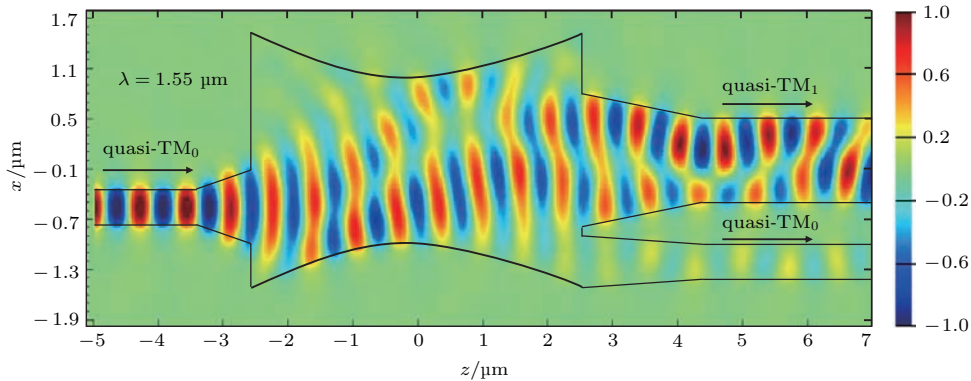


图8 (网刊彩色) Quasi-TM 基模电场主分量  $E_y$  在模阶数转换器中传输演变情况

Fig. 8. (color online) Evolution of the major components  $E_y$  of the fundamental quasi-TM mode through the proposed MOC.

## 5 结 论

本文提出了一种硅基槽式纳米线紧凑型 MMI 型 MOC 结构, 利用槽波导独特的模式特性, 融合了二次锥形结构尺寸小损耗低、线性锥形波导减小插入损耗等优点, 实现了模阶数转换器的小型化. 利用 FDFD 及 FDTD 法对器件进行了详细分析与优化设计, 给出了最优参数及其制作容差, 给出了光场在 MOC 中沿传输方向的传输演变情况. 在  $1.55 \mu\text{m}$  工作波长下, quasi-TM 基模在输出 quasi-TM 一阶模时插入损耗低至 0.35 dB, 串扰低

至 -16.9 dB, 光带宽达 230 nm. 本文完成了器件的理论分析, 给出了器件的工作原理、最优结构参数及其制作容差, 在以后的工作中, 将试制器件样品并测试其性能, 并与设计结果比较, 以验证理论分析的准确性. 本文提出的紧凑型模阶数转换器具有结构紧凑、损耗低、容差性高的优点, 在 MDM 系统中有应用潜力.

## 参考文献

- [1] Paul D J 2009 *Electron. Lett* **45** 582
- [2] Jalali B, Fathpour S 2007 *J. Lightwave Technol.* **24** 4600
- [3] Haralick R M 1979 *Proc. IEEE* **67** 786

- [4] Liu A S, Liao L, Chetrit Y, Hat B N, Rubin D, Panicca M 2010 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **16** 23
- [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] Randel S, Ryf R, Sierra A, Winzer P J, Gnauck A H, Bolle C A, Essiambre R J, Peckham D W, McCurdy A, Lingle R 2011 *Opt. Express* **19** 16697
- [8] Salsi M, Koebele C, Sperti D, Tran P, Mardoyan H, Brindel P, Bigo S, Boutin A, Verluise F, Sillard P, Astruc M B, Provost L, Charlet G 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 618
- [9] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E 2013 *Nat. Photon.* **7** 354
- [10] Foland S, Liu K, Choi K H, Macfarlane D, Lee J B 2011 *11th IEEE International Conference on Nanotechnology* Portland, Oregon, USA, August 15–18, 2011 p1483
- [11] Giles I, Obeysekera A, Chen R, Giles D, Poletti F, Richardson D 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1922
- [12] Igarashi K, Souma D, Tsuritani T, Morita I 2014 *Opt. Express* **22** 20881
- [13] Low A L Y, Yong Y S, You A H, Su F C, Teo C F 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1673
- [14] Park J B, Yeo D M, Shin S Y 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 2084
- [15] Deng Q, Liu L, Li X, Zhou Z 2014 *Opt. Lett.* **39** 5665
- [16] Xiao J B, Xu Y 2016 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **28** 1
- [17] Leuthold J, Joyner C H 2001 *J. Lightwave Technol.* **19** 700
- [18] Singh G, Yadav R P, Janyani V 2010 *Int. J. Commun.* **2010** 115
- [19] Wu J J 2008 *Pier C* **54** 113
- [20] Tsao S L, Guo H C, Tsai C W 2004 *Opt. Commun.* **232** 371
- [21] Poveda A C, Mínguez A H, Gargallo B, Biermann K, Tahraoui A, Santos P V, Munoz P, Cantarero A, Lima J M M D 2015 *Opt. Express* **23** 21213
- [22] Yan C J 2008 *Opt. Optoelectron. Technol.* **6** 88
- [23] Wang J H, Xiao J B, Sun X H 2015 *Appl. Opt.* **54** 3805
- [24] Xu Y, Xiao J B 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 2071
- [25] Soldano L B, Pennings E C M 1995 *J. Lightwave Technol.* **13** 615
- [26] Besse P A, Gini E, Bachmann M, Melchior H 1996 *J. Lightwave Technol.* **14** 2286
- [27] Luo L W, Ophir N, Chen C P, Gabrielli L H, Poitras C B, Bergmen K, Lipson M 2014 *Nat. Commun.* **5** 1661
- [28] Berenger J P 1994 *J. Comput. Phys.* **114** 185
- [29] Xiao J B, Ni H X, Sun X H 2008 *Opt. Lett.* **33** 1848
- [30] Zhao Y J, Wu K L, Cheng K K M 2002 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **50** 1844
- [31] Oskooi A F, Roundy D, Ibanescu M, Bermel P, Joannopoulos J D, Johnson S G 2010 *Comput. Phys. Commun.* **181** 687
- [32] Sullivan D M 2013 *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method* (New York: Wiley) pp85–96
- [33] Taflove A 1988 *Wave Motion* **10** 547
- [34] Yee K S, Chen J S 1997 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **45** 354
- [35] Chew W C, Liu Q H 1996 *J. Comput. Acoust.* **4** 341
- [36] Mur G 1981 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **4** 377
- [37] Xiao J B, Liu X, Sun X 2008 *Jpn. J. Appl. Phys.* **47** 3748
- [38] Xiao J B, Liu X, Sun X 2007 *Opt. Express* **15** 8300

# Full-vectorial analysis of a silicon-based multimode interference mode-order converter for slot waveguide nanowires\*

Xiao Jin-Biao<sup>†</sup> Wang Deng-Feng

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

( Received 8 September 2016; revised manuscript received 13 January 2017 )

## Abstract

Recently, silicon-based photonic integrated circuits (PICs) have attracted considerable interest due to the advantages of high index contrast and complementary metal oxide semiconductor compatible process. Furthermore, to meet the ever-growing bandwidth requirements for data center and supercomputing, several multiplexing on-chip technologies by using silicon PICs are proposed. Among them, the mode division multiplexing (MDM) is widely recognized to be important, where mode-order converters (MOCs) are fundamental building blocks. In addition, slot waveguides can efficiently confine the light in low-index regions, thus forming various kinds of novel photonic devices. In this paper, a compact  $1 \times 2$  multimode interference (MMI) mode-order converter (MOC) for silicon-based slot nanowires is proposed, where straight waveguides, as the input/output channels, are connected to a quadratic-tapered multimode waveguide via linear-tapered waveguides. A full-vectorial finite-difference frequency-domain method is used to analyze the modal characteristics of the used silicon-based vertical slot waveguides; from this, quasi-TM mode is chosen as an input optical signal since its field distribution is strongly confined in the slot, i. e., the electric field strength is greatly enhanced in the vertical slot, and with the increase of the width of the slot waveguide, it can support higher-order quasi-TM modes. Compared with the beating length of rectangular MMI structure, the beating length of quadratic-tapered MMI structure can be effectively reduced with transmission loss lowering. From the imaging position of the guided-mode in MMI region via self-imaging effect, the length of quadratic-tapered MMI structure can be determined accurately where first-order and fundamental quasi-TM modes are outputs, respectively, from wider and narrower channels. A three-dimensional finite-difference time-domain method is utilized to assess the performance of the proposed MOC, where the insertion loss and crosstalk are analyzed in detail. The results show that an MOC with an MMI section of  $3 \times 5 \mu\text{m}^2$  is achieved to be an insertion loss and a crosstalk of  $\sim 0.35$  dB and  $\sim -16.9$  dB, respectively, at a wavelength of  $1.55 \mu\text{m}$  by carefully optimizing the key structural parameters. Moreover, the fabrication deviation of the proposed device is also analyzed in detail and the performance is evaluated, where insertion loss and the contrast are considered. To demonstrate the transmission characteristics of the proposed MOC, the evolution of the excited fundamental quasi-TM mode through the MOC is also presented. Numerical results show that the presented MOC realizes the desired function, converting the fundamental quasi-TM mode into first-order one with reasonable performance. We remark that the present MOC has a good potential application in MDM system to improve the capacity of the silicon-based on-chip transmission system.

**Keywords:** mode-order converter, multimode interference, slot waveguide, silicon photonics

**PACS:** 42.82.-m, 42.79.Gn

**DOI:** 10.7498/aps.66.074203

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11574046, 60978005) and the Jiangsu Provincial Natural Science Foundation, China (Grant No. BK20141120).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [jbxiao@seu.edu.cn](mailto:jbxiao@seu.edu.cn)