

# 基于 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$ 三明治结构的偏振无关 $1 \times 2$ 多模干涉型解复用器的设计\*

汪静丽<sup>1)†</sup> 陈子玉<sup>1)</sup> 陈鹤鸣<sup>2)</sup>

1) (南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 南京 210023)

2) (南京邮电大学贝尔英才学院, 南京 210023)

(2019年9月23日收到; 2019年12月10日收到修改稿)

提出一种基于  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$  三明治结构多模干涉波导的偏振无关  $1 \times 2$  解复用器, 用于分离 1310 和 1550 nm 两个波长. 通过合理选择三明治结构中间层  $\text{SiN}_x$  的折射率, 可以调节同一波长两个正交偏振态的拍长相等, 实现偏振无关; 根据多模干涉原理, 通过合理选择多模干涉波导的长度与宽度, 可以使两个波长的输出像点分别成正像和反像, 实现解复用功能. 运用三维有限时域差分法进行建模仿真, 对结构参数进行优化, 并对器件关键结构参数的制作容差进行了分析. 结果表明: 该器件多模干涉波导的尺寸为  $4.6 \mu\text{m} \times 227.7 \mu\text{m}$ , 插入损耗低至 0.18 dB, 输出波导间的串扰低至 -25.7 dB, 3 dB 带宽可达 60 nm. 另外, 本文提出的器件采用  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  平台, 可有效减小波导尺寸, 提高集成度, 不仅实现了偏振无关, 而且结构紧凑、损耗低, 在未来的集成光路中具有潜在的应用价值.

**关键词:** 多模干涉,  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  平台, 偏振无关, 三明治结构

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

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191449

## 1 引言

通信技术的飞速发展对网络速率及容量提出了越来越高的要求, 波分复用技术成为光纤通信中提高通信容量的一种重要技术手段. 解复用器是波分复用技术中的关键器件之一, 用于分离多个波长, 最常见的器件结构包括马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometers, MZI) 型<sup>[1]</sup>、定向耦合器 (directional couplers, DC) 型<sup>[2]</sup>、光子晶体 (photonic crystal, PhC) 型<sup>[3]</sup>、阵列波导光栅 (arrayed waveguide grating, AWG) 型<sup>[4]</sup> 和多模干涉 (multimode interference, MMI) 型<sup>[5,6]</sup> 等. 其中, DC 型解复用器对制造误差非常敏感; MZI 型

解复用器通常很长并且插入损耗较高; PhC 型和 AWG 型解复用器偏振依赖性高且带宽较低; 而 MMI 型解复用器因其良好的工艺容差性、低损耗以及高带宽在光子集成方面得到了广泛应用.

迄今为止, 绝大多数 MMI 型解复用器是在绝缘体上硅 (silicon-on-insulator, SOI) 平台实现的, 然而随着光互连技术朝着超高速和密集集成方向发展, 传统的 SOI 平台受损耗、工艺容差和灵活性等问题的困扰, 已很难满足光网络和光信息系统发展的需求.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  材料结构稳定, 禁带宽度宽, 对紫外到红外整个波段都是透明的, 损耗低至  $0.045 \pm 0.04 \text{ dB/m}$ <sup>[7]</sup>; 且采用低压化学气相沉积方法可以在  $\text{SiO}_2$  上淀积  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜, 形成  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  平台. 与 SOI 平台相比,  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  平台<sup>[8,9]</sup> 具有低损

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61571237)、江苏省自然科学基金 (批准号: BK20151509)、南京邮电大学校级科研基金 (批准号: NY217047) 和横向课题 (批准号: 2017 外 65) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jlwang@njupt.edu.cn

耗、高工艺容差及更大的灵活性等优势. 2016年, Mu 等 [10] 设计了基于  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  平台的 MMI 型偏振相关的复用/解复用器, 表现出了低损耗、高带宽和工艺容差性好等诸多优越性能, 为此类器件的设计提供了新思路.

此外, MMI 型解复用器大部分都是偏振相关的 [11,12], 即所设计的器件仅仅能够令某一偏振态的各个波长分离. 而在实际中, 光在光纤中传输时, 其偏振态是难以预测的, 若器件是偏振相关的, 会大大限制其应用范围. 对于采用 MMI 波导结构的器件而言, 其偏振相关性是由于横电模 (transverse electric mode, TE) 和横磁模 (transverse magnetic mode, TM) 的拍长不同造成的. 为解决这一问题, 人们在偏振无关 MMI 型光分束器的设计中采用的办法是引入金属作为覆盖层材料 [13]、改变 MMI 波导的形状为锥形 [14] 以及使用三明治结构 [15,16] 等. 文献 [13,14] 存在损耗较大、工艺实现较为复杂等问题, 文献 [15,16] 基于 SOI 平台设计了 MMI 型光分束器, 器件由一个输入波导、MMI 波导、两个输出波导组成, 采用  $\text{Si}/\text{SiN}_x/\text{Si}$  三明治结构, 实现了偏振无关的  $1 \times 2$  光分束功能, 尺寸较小 ( $25.4 \mu\text{m}$  [15] 和  $14.64 \mu\text{m}$  [16]), 插入损耗分别为 TE 模式 0.21 dB, TM 模式 0.73 dB [15] 和 TE 模式 0.26 dB, TM 模式 0.3 dB [16]. 上述文献均只能实现 MMI 型偏振无关光分束功能, 不能实现解复用功能.

本文提出了一种基于  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$  三明治结构多模干涉波导的偏振无关  $1 \times 2$  解复用器. 通过在  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  平台上搭建  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$  三明治结构, 实现偏振无关性能; 采用 MMI 波导结构, 使得与偏振无关的各个波长的输出像点分别成正像和反像, 实现波长的分离. 采用三维有限时域差分法 (three-dimensional finite-difference time-domain, 3D-FDTD) 进行建模和分析, 结果表明: 器件的输入输出波导选择锥形结构, 可以提高成像点的成像质量; 优化后的结构容差性更好,

而且尺寸更小, 器件长度更紧凑 [17], 在未来的集成光路中具有潜在的应用价值.

## 2 工作原理与器件结构设计

### 2.1 MMI 工作原理

通常, 在 MMI 波导中存在自成像效应 [18], 即在传播方向上会周期性地产生自身像, 这是由多模区不同模场在传播过程中互相干涉形成的.

当输入光场处于不同位置时, 在 MMI 波导内能激发出不同的模式.  $W_e$  是多模波导的有效宽度, 当选择输入波导的位置位于相对多模区中心偏移  $\pm W_e/6$  时, 会发生成对干涉 [19]. 周期性成像距离可表示为

$$L = NL_\pi, \quad N = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

当  $N$  为奇数时, 得到的是与输入波导中心轴线成轴对称的反像; 当  $N$  为偶数时, 得到的是输入光场的正像. 其中  $L_\pi$  是拍长, 表示基模和一阶模的拍频长度, 定义为

$$L_\pi = \frac{p}{\beta_0 - \beta_1} \approx \frac{4n_r W_e^2}{3\lambda_0}, \quad (2)$$

其中  $\beta_0$  和  $\beta_1$  分别是多模区域中基模和一阶模的传播常数,  $n_r$  是有效折射率.

### 2.2 三明治结构实现偏振无关的原理

顾名思义, 三明治结构即是 A/B/A 结构, 如图 1(a) 所示, 它由三层材料依次沉积而成, 其中 A 与 B 材料的折射率不等. 假设  $n_0 > n_1$ , 由于高、低折射率材料间的电场不连续性, TE 和 TM 将被局域在不同的材料层进行传输, 如图 1(b) 和图 1(c) 所示. 因此, 通过改变三明治结构中间层 B 材料的折射率  $n_0$ , 可以调节 TE 和 TM 偏振态的拍长相, 使得同一波长不同偏振态的输出像点在同一位置, 实现偏振无关.

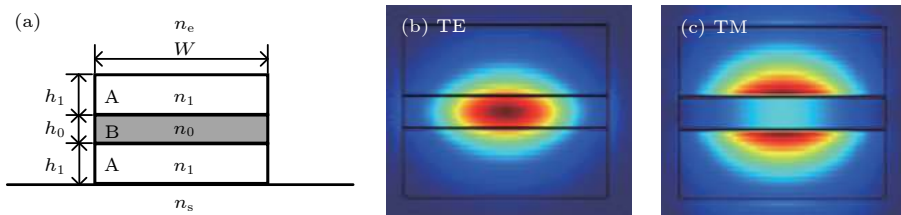


图 1 (a) 三明治结构示意图; (b) quasi-TE, (c) quasi-TM 基模在三明治波导中的场分布 ( $n_0 > n_1$ )

Fig. 1. (a) Schematic configuration of the sandwiched structure; field distributions for the (b) quasi-TE and (c) quasi-TM fundamental mode in a sandwiched waveguide ( $n_0 > n_1$ ).

## 2.3 器件结构设计

所设计的 MMI 型解复用器如图 2(a) 所示, 器件由输入波导、MMI 波导和输出波导三部分组成, 其中输入和输出波导结构完全相同, 均由直波导和锥形波导组合而成.  $L_{\text{MMI}}$  和  $W_{\text{MMI}}$  分别为 MMI 波导的长度和宽度;  $L_{\text{taper}} = 20 \mu\text{m}$  是锥形波导的长度, 其宽度从  $W_1 = 1.2 \mu\text{m}$  渐变至  $W_0 = 0.6 \mu\text{m}$ ,

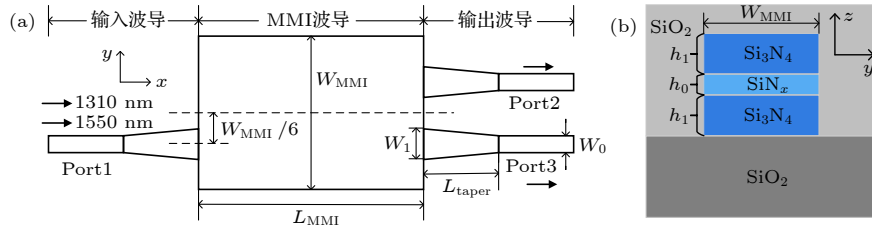


图 2 解复用器结构示意图 (a) 俯视图; (b) MMI 波导截面示意图

Fig. 2. Schematic configuration of the demultiplexer structure: (a) Top view; (b) cross section of the MMI waveguide.

## 3 器件参数的优化

### 3.1 偏振无关功能的实现

首先设计三明治结构, 用于实现同一波长的两个正交偏振态拍长相等, 达到偏振无关的目的. 采用 3D-FDTD 对所提出的偏振无关  $1 \times 2$  MMI 型解复用器进行建模仿真, 求出两个最低阶模的传播常数  $\beta_0$  和  $\beta_1$ , 代入 (2) 式, 即可算出同一波长不同偏振态所对应的拍长. 若要实现器件的偏振无关, 所求拍长需要满足 (3) 式,

$$L_{\pi}(\lambda, \text{TE}) = L_{\pi}(\lambda, \text{TM}), \quad (3)$$

其中  $L_{\pi}(\lambda, \text{TE})$  和  $L_{\pi}(\lambda, \text{TM})$  分别表示波长为  $\lambda$  时的 TE 偏振态和 TM 偏振态的拍长.

图 3(a)—图 3(c) 给出了当  $W_{\text{MMI}}$  分别为 3, 4, 5  $\mu\text{m}$  时,  $L_{\pi}$  随  $n(\text{SiN}_x)$  的变化关系. 由图 3 可知, 随着  $n(\text{SiN}_x)$  的增大, 同一波长所对应的两个正交偏振态的拍长均随之单调增加, 且  $L_{\pi}(\lambda, \text{TE})$  的增长幅度大于  $L_{\pi}(\lambda, \text{TM})$ , 从而使得两者存在交叉点 (如图 3 中虚线所圈处), 交叉点处  $L_{\pi}(\lambda, \text{TE}) = L_{\pi}(\lambda, \text{TM})$ . 这与图 1(b) 和图 1(c) 所示一致, 正是由于 TE 模主要限制在中间层  $\text{SiN}_x$  中传输, 所以当  $n(\text{SiN}_x)$  增加时, TE 模的有效折射率相应增加, 从而  $L_{\pi}(\lambda, \text{TE})$  随之增大; 对于 TM 模而言, 由于主要分布于中间层两侧, 受其影响较小, 故而变化较为平缓. 值得注意的是, 不同波长的交叉点分别对应的

满足绝热条件<sup>[20]</sup>; 输入和输出波导中心与 MMI 波导中心的距离为  $W_{\text{MMI}}/6$ . 图 2(b) 所示的  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$  三明治结构中,  $h_0 = 0.11 \mu\text{m}$  和  $h_1 = 0.25 \mu\text{m}$  分别为  $\text{SiN}_x$  层和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  层高度; 离子辅助沉积方法可调节中间层  $\text{SiN}_x$ <sup>[21–24]</sup> 的折射率  $n(\text{SiN}_x)$  在 1.72—3.43 范围内变化,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的折射率约为 2; 另外输入、输出波导与 MMI 波导具有类似的截面结构, 不再赘述.

$n(\text{SiN}_x)$  几乎相同, 非常有利于器件实现多波长的偏振无关性能. 对比图 3(a)—图 3(c) 可见, 对不同的  $W_{\text{MMI}}$ , 均存在相应的  $n(\text{SiN}_x)$  值, 使得器件满足偏振无关条件 (3) 式.

为了便于后续波长分离时提供相关参数, 需要进一步探讨器件满足偏振无关条件时,  $W_{\text{MMI}}$  与  $n(\text{SiN}_x)$  的变化关系如图 4 所示, 随着  $W_{\text{MMI}}$  增大,  $n(\text{SiN}_x)$  值单调递减. 图 5(a) 给出了对应于图 4 中每一组  $W_{\text{MMI}}$  和  $n(\text{SiN}_x)$ , 所求出的不同波长不同偏振态所对应的拍长. 很明显: 对于同一波长的两个正交偏振态所对应的拍长而言, 两者差别较小. 为了进一步刻画它们间的差异, 引入不同偏振态间的拍长比  $M = L_{\pi}(\lambda, \text{TE})/L_{\pi}(\lambda, \text{TM})$  进行描述, 图 5(b) 给出了  $M$  随  $W_{\text{MMI}}$  的变化关系, 这些离散的点基本围绕在 1 附近分布, 进一步验证了其满足偏振无关条件.

### 3.2 波长分离功能的实现

当各个波长的偏振无关功能实现后, 需要在此基础上实现多波长的分离功能. 由 (1) 式可知: 当 1310 和 1550 nm 两个波长输入同一个多波长偏振无关 MMI 型器件, 且输出光场为输入光场的像点 (正像或反像) 时, MMI 波导的总长度  $L_{\text{MMI}}$  满足 (4) 式:

$$L_{\text{MMI}} = pL_{\pi}(1310 \text{ nm}) = qL_{\pi}(1550 \text{ nm}), \quad p \neq q, \quad (4)$$

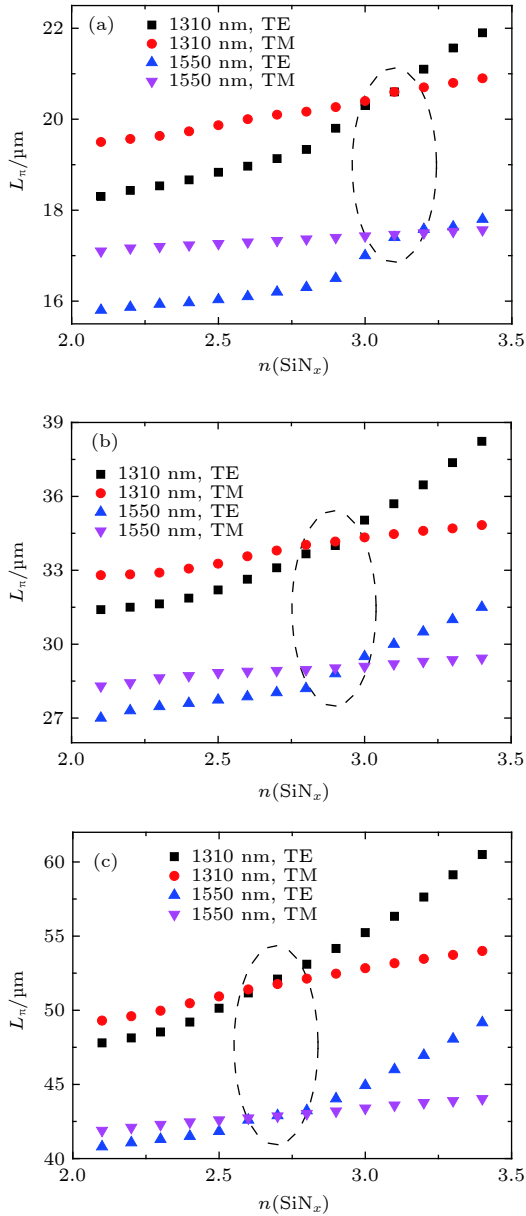


图3  $L_\pi$  随  $n(\text{SiN}_x)$  的变化 (a)  $W_{\text{MMI}} = 3 \mu\text{m}$ ; (b)  $W_{\text{MMI}} = 4 \mu\text{m}$ ; (c)  $W_{\text{MMI}} = 5 \mu\text{m}$

Fig. 3. Beat length  $L_\pi$  as a function of  $n(\text{SiN}_x)$  when the MMI width  $W_{\text{MMI}}$  is: (a)  $3 \mu\text{m}$ ; (b)  $4 \mu\text{m}$ ; (c)  $5 \mu\text{m}$ .

其中  $p$  和  $q$  均为正整数. 当  $p$  和  $q$  同为奇数 (偶数) 时, 两个波长的输出光场均成反像 (正像), 即像点重叠, 无法实现波长的分离; 当  $p$  为奇数 (偶数),  $q$  为偶数 (奇数) 时, 1310 nm 的输出光场成反像 (正像), 1550 nm 的输出光场成正像 (反像), 两个像点位于不同位置, 波长分离即实现解复用功能. 综上所述且结合文献 [25], 要分离 1310 和 1550 nm 两个波长, 仅需要满足 (5) 式即可,

$$L_{\text{MMI}} = nL_\pi(1310 \text{ nm}) = (n + 1)L_\pi(1550 \text{ nm}),$$

$$n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

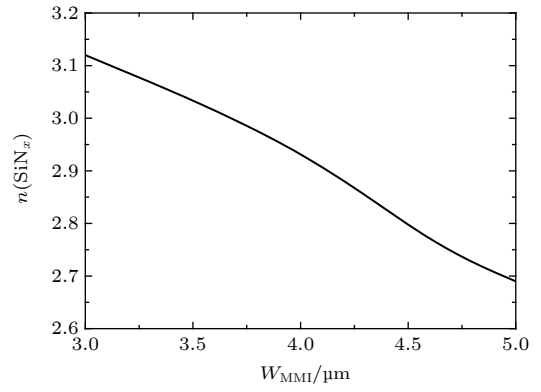


图4 器件满足偏振无关条件时,  $n(\text{SiN}_x)$  随  $W_{\text{MMI}}$  的变化关系

Fig. 4.  $n(\text{SiN}_x)$  as functions of  $W_{\text{MMI}}$  when the demultiplexer is polarization-insensitive.

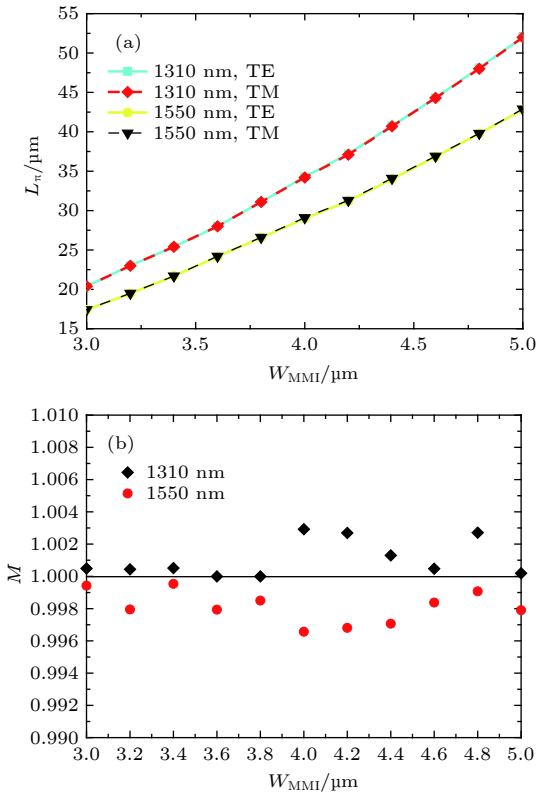


图5 器件满足偏振无关条件时 (a)  $L_\pi$  和 (b)  $M$  随  $W_{\text{MMI}}$  的变化

Fig. 5. (a)  $L_\pi$  and (b)  $M$  as functions of  $W_{\text{MMI}}$  when the demultiplexer is polarization-insensitive.

定义不同波长间拍长比  $R = \frac{L_\pi(1310 \text{ nm})}{L_\pi(1550 \text{ nm})} = \frac{n + 1}{n}$ , 只要寻找到合适的  $n$  值, 就能实现波长的分离. 图 6 给出了  $R$  随  $W_{\text{MMI}}$  的变化: 当  $W_{\text{MMI}}$  增大时,  $R$  随之增大, 且在较大的  $W_{\text{MMI}}$  值附近,  $R$  增长较快. 通过对  $R$  数值的甄选, 发现仅当  $W_{\text{MMI}} = 4.6 \mu\text{m}$  时,  $R = 1.2 = 6/5$  (如图 6 中 A 点所示),



此时  $n = 5$ , 满足 (5) 式, 可以实现两个波长的分离. 此外, 对照图 4 和图 5 可知, 当  $W_{\text{MMI}} = 4.6 \mu\text{m}$  时,  $n(\text{SiN}_x) = 2.76$ , 此时波长 1310 和 1550 nm 所对应的  $M$  分别为 1.0015 和 1.0066, 均很小, 可以实现偏振无关. 将上述数值代入 (5) 式, 并将各计算结果取平均值, 得到  $L_{\text{MMI}} = 227.7 \mu\text{m}$ .

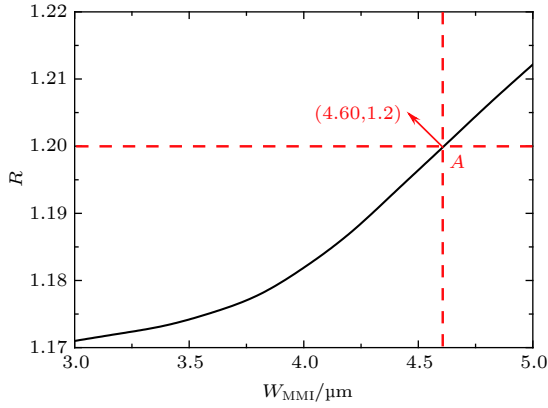


图 6  $R$  随  $W_{\text{MMI}}$  的变化  
Fig. 6.  $R$  as functions of  $W_{\text{MMI}}$ .

综上, 当参数取  $W_{\text{MMI}} = 4.6 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{MMI}} = 227.7 \mu\text{m}$ ,  $n(\text{SiN}_x) = 2.76$  时, 可以实现偏振无关的  $1 \times 2$  MMI 型解复用器. 此时 1310 和 1550 nm 两个波长所对应的两个正交偏振光信号传播的光场分布如图 7 所示: 1310 nm 的两个偏振态输出像点基本重合, 且成反像, 从输出端口 Port2 输出; 1550 nm 的两个偏振态输出像点基本重合, 且成正

像, 从输出端口 Port3 输出. 设计的器件成功分离了 1310 和 1550 nm, 且实现了偏振无关.

### 3.3 性能分析

对于解复用器, 最重要的性能是插入损耗 (insertion loss, IL) 和串扰 (crosstalk, CT), 其定义如 (6) 式和 (7) 式所示:

$$\text{IL}(\text{dB}) = -10 \lg(P_d/P_{\text{in}}), \quad (6)$$

$$\text{CT}(\text{dB}) = 10 \lg(P_u/P_d), \quad (7)$$

其中  $P_{\text{in}}$  是输入波导中的功率,  $P_d$  和  $P_u$  分别是目标输出波导和非目标输出波导中的输出功率 (例如, 对于 1310 nm 波长,  $P_d$  和  $P_u$  分别是 Port2 和 Port3 的输出功率). 本文设计的 MMI 型解复用器的各性能参数如表 1 所示, 插入损耗低至 0.18 dB, 输出波导间的串扰低至 -25.7 dB.

此外, 在对图 2(a) 所示结构进行设计时, 曾尝试采用单一的直波导作为输入输出波导, 经过多次仿真模拟发现, 波导宽度对输入光场有影响. 当波导宽度较小时, 会造成光场泄露而引入巨大的插入损耗; 当波导宽度较大时, 则存在高阶模, 从而无法满足单模条件. 表 2 给出了当 MMI 型解复用器的输入输出波导仅为直波导 (宽度  $W = 1 \mu\text{m}$ ) 时的性能参数, 通过和表 1 数据的对比, 可以发现其性能有所劣化. 其原因是: 锥形波导和直波导的组合结构, 可在满足单模条件的同时减小色散, 改善了自成像点的质量.

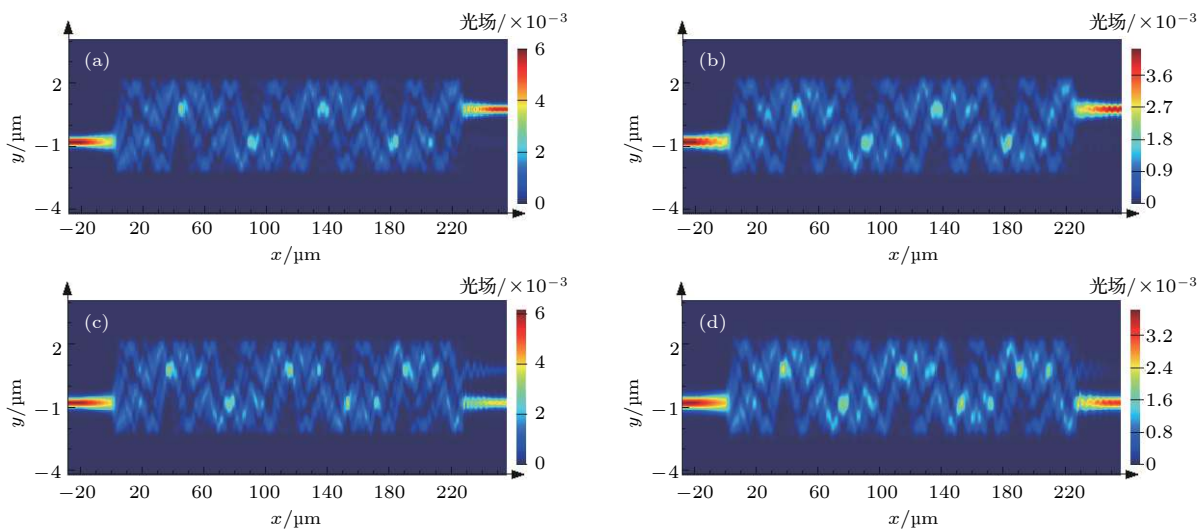


图 7 MMI 型解复用器件的光场分布图 (a) 1310 nm, TE 波; (b) 1310 nm, TM 波; (c) 1550 nm, TE 波; (d) 1550 nm, TM 波  
Fig. 7. Field distributions of the MMI demultiplexer: (a) Quasi-TE mode, at 1310 nm; (b) quasi-TM mode, at 1310 nm; (c) quasi-TE mode, at 1550 nm; (d) quasi-TM mode, at 1550 nm.

表 1 MMI 型解复用器的性能参数

Table 1. Performances of the MMI demultiplexer.

性能参数	IL/dB	CT/dB
1310 nm, TE	0.25	-21.32
1310 nm, TM	0.18	-24.40
1550 nm, TE	0.65	-20.97
1550 nm, TM	0.38	-25.70

表 2 输入、输出波导均为直波导时的 MMI 型解复用器的性能参数

Table 2. Performances of the MMI demultiplexer when input and output waveguides are straight.

性能参数	IL/dB	CT/dB
1310 nm, TE	0.500	-17.73
1310 nm, TM	0.173	-23.80
1550 nm, TE	1.380	-14.21
1550 nm, TM	0.460	-22.54

实际上, 光源并不是单色光, 因而需要考虑光波长变化对器件性能的影响. 对于解复用器而言,

通常用 3 dB 带宽进行衡量. 图 8 给出了归一化输出功率随波长的变化关系, 由图 8(a) 可见, 当入射光的波长变化范围为 1280—1340 nm 时, Port2 的输出光功率仍保持在输入光功率的一半以上, 也即对于 1310 nm 波段, 3 dB 带宽可以达到 60 nm. 同理, 由图 8(b) 可得, 对于 1550 nm 波段, 3 dB 带宽也可以达到 60 nm.

此外, 由于器件在工艺制作过程中会存在一定的偏差, 因而需考察工艺偏差对其光学性能的影响. 图 9 和图 10 分别给出了当 MMI 波导的长度和 SiN<sub>x</sub> 的厚度发生变化时, 器件的 IL 和 CT 的变化情况. 由图 9 可知, 器件对 MMI 波导的长度的工艺容差性较好, 当  $L_{\text{MMI}}$  从 224  $\mu\text{m}$  增加到 231  $\mu\text{m}$  时, IL 一直小于 3 dB, CT 一直小于 -10 dB. 由图 10 可知, 当 SiN<sub>x</sub> 的厚度有  $\pm 10$  nm 的误差时, 器件仍然有着良好的性能, 尤其当  $h(\text{SiN}_x)$  在 0.10—0.11  $\mu\text{m}$  范围内变化时, IL < 1 dB, CT < -20 dB.

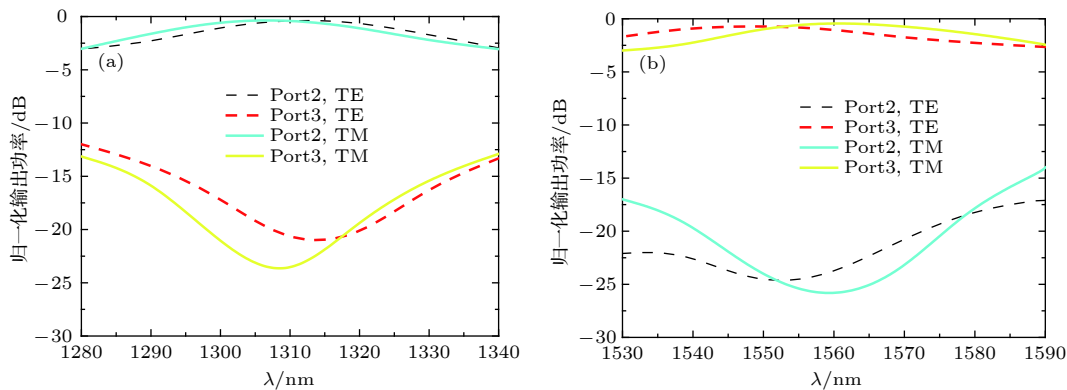


图 8 Port2 和 Port3 两端口归一化输出光功率随波长的变化 (a) 1310 nm 波段; (b) 1550 nm 波段

Fig. 8. Output powers (normalized to the input power) from Port2 and Port3 as the wavelength varies: (a) 1310 nm band; (b) 1550 nm band.

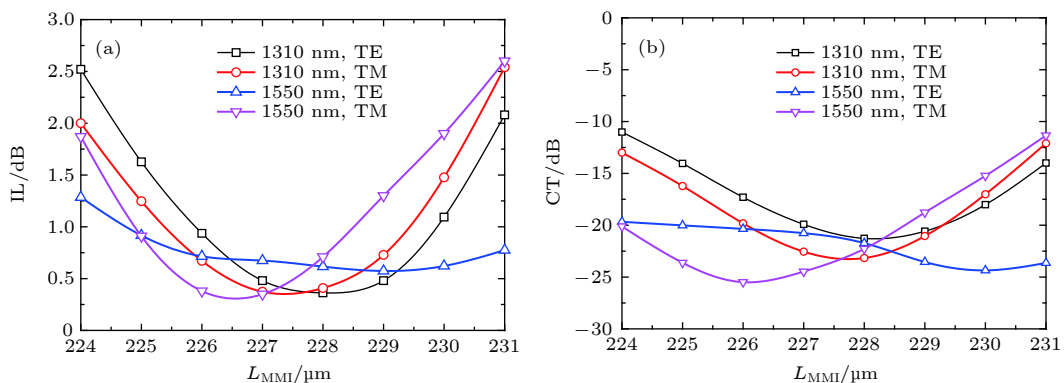


图 9 性能参数随  $L_{\text{MMI}}$  的变化 (a) IL; (b) CT

Fig. 9. Performance parameters as functions of  $L_{\text{MMI}}$ : (a) IL; (b) CT.

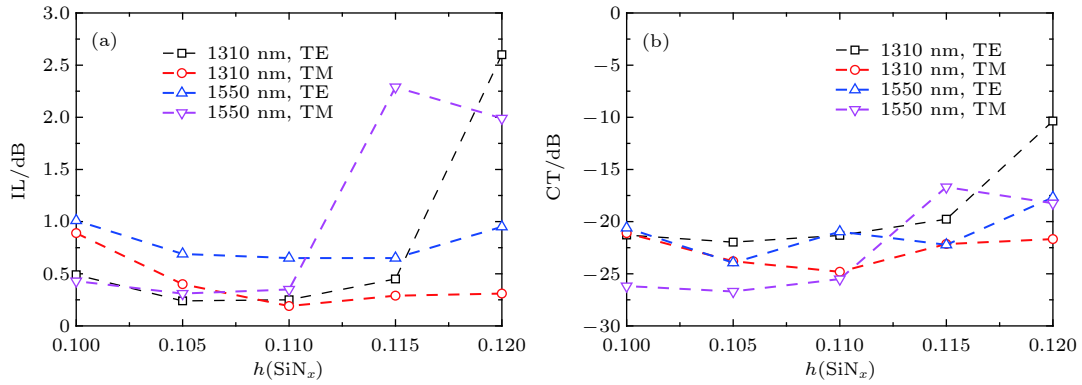


图 10 性能参数随  $h(\text{SiN}_x)$  的变化 (a) IL; (b) CT

Fig. 10. Performance of parameters as functions of  $h(\text{SiN}_x)$ : (a) IL; (b) CT.

## 4 结 论

设计了一种基于  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$  三明治结构的偏振无关  $1 \times 2$  MMI 解复用器, 用于分离 1310 和 1550 nm 两个波长. 首先讨论了如何利用  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$  三明治结构实现偏振无关, 分析了不同  $W_{\text{MMI}}$  下  $L_\pi$  随  $n(\text{SiN}_x)$  的变化关系, 最终得出结论: 对于不同的  $W_{\text{MMI}}$ , 均存在相应的  $n(\text{SiN}_x)$  值, 使得器件满足偏振无关条件. 然后对如何实现波长分离功能进行了讨论, 给出了拍长比  $R$  随  $W_{\text{MMI}}$  的变化关系, 确定了参数取  $W_{\text{MMI}} = 4.6 \mu\text{m}$ ,  $L_{\text{MMI}} = 227.7 \mu\text{m}$ ,  $n(\text{SiN}_x) = 2.76$  时, 两个波长的输出光场分别成正像和反像, 器件同时实现了偏振无关和解复用功能. 最后对器件的各种性能进行了分析, 基于  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  平台使器件表现出了高带宽、高工艺容差性等优越的性能, 且有效地减小了器件的尺寸. 该解复用器的 MMI 波导的尺寸仅为  $4.6 \mu\text{m} \times 227.7 \mu\text{m}$ , 在 1310 nm (1550 nm) 工作波长下, TE 模与 TM 模的 IL 分别为 0.25 dB (0.65 dB) 与 0.18 dB (0.38 dB), 输出波导间的 CT 分别为  $-21.32 \text{ dB}$  ( $-20.97 \text{ dB}$ ) 与  $-24.4 \text{ dB}$  ( $-25.7 \text{ dB}$ ). 器件结构简单, 性能优越, 在新型集成光子系统中具有潜在的应用价值.

## 参考文献

[1] Walker R G, Urquhart J, Bennion I, Carter A C 1990 *IEE Proc.: Optoelectron.* **137** 33  
 [2] Choi C H, Kim N K, Jo S B, Lee M W, O B H, Lee S G, Park S G 2005 *Proc. SPIE* **5723** 368  
 [3] Shih T T, Wu Y D, Lee J J 2009 *IEEE Photonics Technol.*

*Lett.* **21** 18  
 [4] Hibino Y 2002 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **8** 1090  
 [5] Triki S, Najjar M, Rezig H 2007 *Icton Mediterranean Winter Conference, Sousse, Tunisia, December 6–8, 2007* p104  
 [6] Zhang S, Ji W, Yin R, Li X, Gong Z, Lv L 2018 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **30** 107  
 [7] Liu Y D, Li Z H, Yu J Z 2019 *Physics* **48** 82 (in Chinese) [刘耀东, 李志华, 余金中 2019 物理 **48** 82]  
 [8] Roeloffzen C G H, Hoekman M, Klein E J, et al. 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **24** 121  
 [9] Sacher W D, Huang Y, Liang D, Barwicz T, Jared C, Mikkelsen J C, Taylor B J F, Lo G Q, Poon J K S 2014 *Optical Fiber Communications Conference & Exhibition IEEE, San Francisco, CA, USA, March 9–13, 2014* pTh1A.3  
 [10] Mu J, Sergio A. Vázquez-Córdova, Sefunc M A, Yong Y S, García-Blanco S M 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 3603  
 [11] Lin Y J, Lee S L 2002 *Opt. Quantum Electron.* **34** 1201  
 [12] Chack D, Kumar V, Singh D P 2016 *International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS), Rome, Italy, February 27–29, 2016* p227  
 [13] Pan C, Rahman B M A 2016 *IEEE Photonics J.* **8** 114  
 [14] Dai D, He S 2008 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **20** 599  
 [15] Fujisawa T, Koshiha M 2006 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **18** 1246  
 [16] Chiang K S, Liu Q 2011 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **23** 1277  
 [17] Shi Y, Anand S, He S 2007 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **19** 1789  
 [18] Soldano L B, Pennings E C M 1995 *J. Lightwave Technol.* **13** 615  
 [19] Bachmann M, Besse P A, Melchior H 1994 *Appl. Opt.* **33** 3905  
 [20] Fu Y, Ye T, Tang W, Chu T 2014 *Photonics Res.* **2** 41  
 [21] Lee C C, Chen H L, Hsu J C, Tien C L 1999 *Appl. Opt.* **38** 2078  
 [22] Lelièvre J F, Kafle B, Saint-Cast P, Brunet P, Magnan R, Hernandez E, Pouliquen S, Massines F 2019 *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* **27** 1007  
 [23] Guler I 2019 *Mater. Sci. Eng., B* **246** 21  
 [24] Zou X Y, Yuan J S, Jiang Y X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 148106 (in Chinese) [邹祥云, 苑进社, 蒋一祥 2012 物理学报 **61** 148106]  
 [25] Li B, Chua S J, Leitz C W, Fitzgerald E A 2002 *Opt. Eng.* **41** 723

# Design of polarization-insensitive $1 \times 2$ multimode interference demultiplexer based on $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$ sandwiched structure\*

Wang Jing-Li<sup>1)†</sup> Chen Zi-Yu<sup>1)</sup> Chen He-Ming<sup>2)</sup>

1) (*College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)

2) (*Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)

( Received 23 September 2019; revised manuscript received 10 December 2019 )

## Abstract

An ultra-compact  $1 \times 2$  demultiplexer based on multimode interference (MMI) waveguide is proposed to separate the 1310 nm and 1550 nm wavelengths, in which  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$  sandwiched structure is used to realize polarization insensitivity. Firstly, how to use  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$  sandwich structure to achieve polarization-independent is discussed. Keeping the width of MMI waveguide  $W_{\text{MMI}}$  unchanged, the beat lengths of two orthogonal polarization states at same wavelength versus refractive indexes of  $\text{SiN}_x$  are calculated. Similar simulation curves with different  $W_{\text{MMI}}$  values and wavelengths are also provided. The result shows that there are crossing points in the beat length curves. It means that the beat lengths for the two orthogonal polarization states at the same wavelength can be identical by choosing the proper refractive index of the  $\text{SiN}_x$ . More importantly, under exactly the same premise, for the two wavelengths, their crossing points are almost identical. Then, how to realize the function of wavelength separation is studied. A variable called the beat length ratio is given, which is defined as the beat length ratio of two working wavelengths under the same polarization state. When the beat length ratio equals an even number divided by an odd number, one wavelength is even multiple of beat length and the other wavelength is odd multiple of beat length, and vice versa, that is to say, a single image and a mirror image for the two working wavelengths are formed respectively. Therefore, the two working wavelengths will output from different output ports, therefore the two wavelengths are successfully separated from each other. The demultiplexer based on  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  platform has a compact structure, easy integration and good tolerance. Three-dimensional finite-difference time-domain method is used for simulation, and the results show that the size of the MMI waveguide is  $4.6 \mu\text{m} \times 227.7 \mu\text{m}$ ; the insertion loss and crosstalk are as low as 0.18 dB and  $-25.7$  dB respectively; a broad 3-dB bandwidth of 60 nm is achieved. Moreover, the fabrication deviation of the key structural parameters about the device is discussed in detail, and the insertion loss and crosstalk are considered. To demonstrate the transmission characteristics of the demultiplexer, the evolution of the excited fundamental mode in the demultiplexer is also given. The novel demultiplexer is polarization independent and can work at wavelengths of 1310 nm and 1550 nm simultaneously. It has potential application value in future integrated optical circuits.

**Keywords:** multimode interference,  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  platform, polarization-insensitive, sandwiched structure

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

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191449

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61571237), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20151509), NUPTSF, China (Grant No. NY217047), and the Horizontal Program (Grant No. 2017 external 65).

† Corresponding author. E-mail: [jlwang@njupt.edu.cn](mailto:jlwang@njupt.edu.cn)