

# SiN<sub>x</sub>填充的定向耦合器型偏振无关解复用器

汪静丽<sup>1\*</sup>, 刘海广<sup>1</sup>, 张跃腾<sup>1</sup>, 宋雨辰<sup>1</sup>, 沈晗潇<sup>1</sup>, 陈鹤鸣<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023;

<sup>2</sup>南京邮电大学贝尔英才学院, 江苏 南京 210023

**摘要** 设计了一种基于 SiN<sub>x</sub> 填充的定向耦合器(DC)型偏振无关解复用器,用于分离 1310 nm 和 1550 nm 两个波长的光信号。采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)方法调节 DC 波导间隙内填充的 SiN<sub>x</sub> 材料的折射率,使同一波长下横电(TE)偏振模和横磁(TM)偏振模的耦合长度相等,实现器件的偏振无关功能。通过优化波导间隙,调整两个波长光信号所对应的耦合长度比,选择合适的值可使其分别从两个端口输出,实现波长分离功能。运用三维有限时域差分方法进行建模仿真,对器件进行参数优化和性能分析。结果表明:所提出的解复用器的耦合区长度仅为 22.8 μm,插入损耗和串扰(CT)分别低至 0.05 dB 和 -21.58 dB,CT 小于 -10 dB 的带宽可达 79 nm,且总体容差性良好。所设计的器件在未来的集成光路系统中具有潜在的应用价值。

**关键词** 光学器件; 定向耦合器; 偏振无关; SiN<sub>x</sub>; 解复用器

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1923002

## Directional Coupler-Based Polarization-Independent Demultiplexer Filled with SiN<sub>x</sub>

Wang Jingli<sup>1\*</sup>, Liu Haiguang<sup>1</sup>, Zhang Yueteng<sup>1</sup>, Song Yuchen<sup>1</sup>, Shen Hanxiao<sup>1</sup>,  
Chen Heming<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China

**Abstract** A directional coupler (DC)-based polarization-independent demultiplexer filled with SiN<sub>x</sub> is designed to separate the 1310-nm and 1550-nm optical signals. The plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) method is used to adjust the refractive index of the SiN<sub>x</sub> material filled in the gap between the DC waveguides. As a result, the coupling length of the transverse-electric (TE) polarization mode equals that of the transverse-magnetic (TM) polarization mode at the same wavelength, and the polarization-independent function of the device is thereby fulfilled. The ratio of the coupling lengths corresponding to the two optical signals with different wavelengths is adjusted by optimizing the gap between the waveguides. When a proper value of the coupling length ratio is chosen, the two optical signals can be output from two ports, respectively, to achieve the wavelength separation function. Modeling and simulation are conducted by the three-dimensional finite-difference time-domain method to optimize the parameters of the device and analyze its performance. The results show that the proposed demultiplexer achieves a coupling region as short as 22.8 μm and an insertion loss and a crosstalk (CT) as low as 0.05 dB and -21.58 dB, respectively. Besides, the bandwidth corresponding to a CT smaller than -10 dB reaches 79 nm, and the device offers favorable tolerance on the whole. The device designed has application potential in future integrated optical circuit systems.

**Key words** optical devices; directional coupler; polarization-independent; SiN<sub>x</sub>; demultiplexer

收稿日期: 2022-01-24; 修回日期: 2022-03-07; 录用日期: 2022-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(61571237)、江苏省自然科学基金(BK20151509)、南京邮电大学校级科研基金(NY217047)

通信作者: \*jlwang@njupt.edu.cn

# 1 引言

近年来,随着数据的爆发式增长,人们对通信速率和传输容量的要求越来越高,实际应用中出现了多种复用技术,其中波分复用技术<sup>[1]</sup>作为提高通信传输容量的典型方案得到广泛应用。解复用器是波分复用技术中的核心器件,用于实现多个波长的分离,最常见的解复用器有阵列波导光栅(AWG)型<sup>[2]</sup>、光子晶体(PC)型<sup>[3]</sup>、马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型<sup>[4]</sup>、多模干涉(MMI)型<sup>[5-9]</sup>和定向耦合器(DC)型<sup>[10-12]</sup>等。其中,DC型解复用器因其结构简单、尺寸小等特点得到广泛应用。

绝缘体上硅<sup>[13]</sup>(SOI)平台的芯层与包层间的折射率差大,使其具有强的光束束缚能力,同时其制作工艺与互补金属氧化物半导体相兼容,因此SOI是大部分DC型解复用器的首选平台。但是基于SOI的DC型解复用器存在较强的偏振相关性<sup>[14-15]</sup>,限制了其应用范围。目前已报道的实现DC偏振无关的方法包括采用三明治波导<sup>[12]</sup>、弯曲波导<sup>[16]</sup>、脊型波导<sup>[17]</sup>、亚波长光栅(SWG)<sup>[18-20]</sup>、槽波导<sup>[21-22]</sup>和布拉格光栅<sup>[23]</sup>等。然而,采用弯曲波导、脊型波导和槽波导后,器件的尺寸与损耗均较大;引入三明治波导、SWG和布拉格光栅后,结构变得复杂,器件加工难度大且成本高。

综上,本文设计了一种基于SiN<sub>x</sub>填充的DC型偏振无关解复用器,仅在传统DC结构的波导间隙内填充单一SiN<sub>x</sub>材料,并合理选取SiN<sub>x</sub>折射率的大小,使同一波长的横电(TE)和横磁(TM)偏振模的耦合长度相等,实现器件的偏振无关。通过优化波导间隙,调整两个波长光信号所对应的耦合长度比,可使其分别从不同的端口输出,实现解复用功能。采用三维有限时域差分法进行建模和仿真。结果表明,所提出的偏振无关解复用器尺寸小、性能优良且总体容差性较好,在未来的集成光路系统中具有较大的应用价值。

# 2 工作原理与器件结构设计

## 2.1 工作原理

传统的DC由两根参数完全相同的平行直波导并列排布组成,根据耦合模理论<sup>[24]</sup>,满足相位匹配条件时,光信号在其中某一波导内传输L<sub>c</sub>距离后将完全转移至另一波导,且随着距离的增加在波导间周期性来回转移。L<sub>c</sub>为耦合长度,可表示为

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_o}, \quad (1)$$

式中:β<sub>e</sub>和β<sub>o</sub>分别为偶模和奇模的传播常数。

## 2.2 器件设计思路与结构

DC型解复用器若要实现偏振无关特性,需要满足如下公式:

$$L_{c,TE}(\lambda) = L_{c,TM}(\lambda), \quad (2)$$

式中:L<sub>c,TE</sub>(λ)和L<sub>c,TM</sub>(λ)分别为波长为λ时的TE和TM偏振模的耦合长度<sup>[25]</sup>,可分别表示为

$$L_{c,TE}(\lambda) = \frac{\lambda}{2[n_{\text{even}}^{(TE)} - n_{\text{odd}}^{(TE)}]}, \quad (3)$$

$$L_{c,TM}(\lambda) = \frac{\lambda}{2[n_{\text{even}}^{(TM)} - n_{\text{odd}}^{(TM)}]}, \quad (4)$$

式中:n<sub>even</sub><sup>(TE)</sup>[n<sub>even</sub><sup>(TM)</sup>]和n<sub>odd</sub><sup>(TE)</sup>[n<sub>odd</sub><sup>(TM)</sup>]分别为波导中TE(TM)偏振模偶模和奇模的有效折射率。

对于一般的DC型解复用器而言,SOI平台的偏振相关性导致L<sub>c,TE</sub>(λ)≠L<sub>c,TM</sub>(λ)。因为耦合长度和不同偏振模的有效折射率有关,为了实现器件的偏振无关特性,解决办法之一就是在DC波导中引入SWG结构,如图1(a)、(b)所示<sup>[18-19]</sup>。其设计思路为将引入的SWG等效为均匀折射率介质(图2),通过调节SWG的结构参数,改变等效均匀折射率介质的折射率大小,从而影响不同偏振模的有效折射率,使L<sub>c,TE</sub>(λ)与L<sub>c,TM</sub>(λ)相等,实现偏振无关特性。

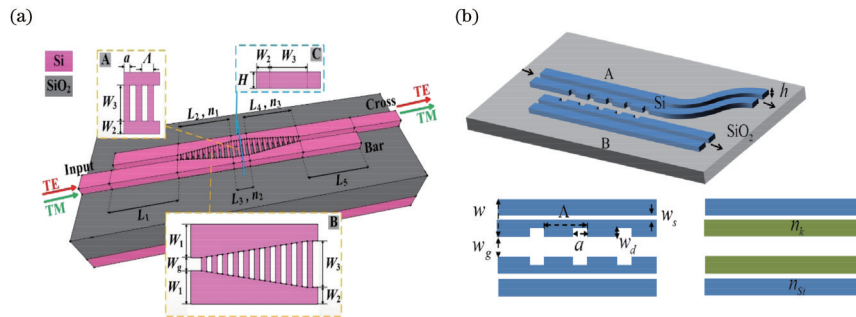


图 1 基于SWG结构实现偏振无关的DC波导<sup>[18-19]</sup>。(a)文献[18]中结构;(b)文献[19]中结构

Fig. 1 Polarization independent DC waveguides based on SWG structure<sup>[18-19]</sup>. (a) Structure in Ref. [18]; (b) structure in Ref. [19]

然而SWG结构相对复杂,对制造工艺有一定的要求,而且受限于衍射效应(光栅周期必须远小于布拉格周期)。因此,本文考虑是否存在能够代替SWG结构的某种折射率可调的材料,实现器件的偏振无关功能。调研表明SiN<sub>x</sub><sup>[26-27]</sup>材料可通过等离子体增强化学气相沉积(PECVD)方法控制SiH<sub>4</sub>和NH<sub>3</sub>的流量比,

进而调整SiN<sub>x</sub>材料中N和Si的比例(即调整x),最终使其折射率在1.72~3.43之间可调。并且,SiN<sub>x</sub>材料的折射率在红外波段对波长变化不敏感<sup>[28]</sup>,即随着波长的变化,其折射率几乎保持不变,波长变化对器件的偏振无关特性没有影响。此外,SiN<sub>x</sub>材料已被广泛地应用在众多光子器件的设计中<sup>[7-8,12,29]</sup>,取得了良好的

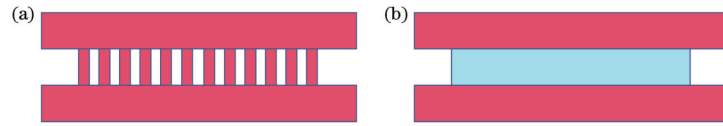


图 2 SWG 结构和等效均匀折射率介质示意图。(a) SWG 结构示意图; (b) 等效均匀折射率介质示意图

Fig. 2 Diagrams of SWG structure and equivalent uniform refractive index medium. (a) Diagram of SWG structure; (b) diagram of equivalent uniform refractive index medium

效果。综上,本文拟将 SiN<sub>x</sub> 材料填充至 DC 波导间隙内,通过调整波导间隙和选择合适的 SiN<sub>x</sub> 折射率  $n(\text{SiN}_x)$ ,实现偏振无关的解复用器。

如图 3 所示,所提出的 DC 型偏振无关解复用器由输入波导、耦合区波导和输出波导构成。其中,耦合区波导长度为  $L$ ,由传统 DC 波导以及波导间隙  $g$  内填充的 SiN<sub>x</sub> 材料组成。DC 波导包括参数完全相同的波导 A 和波导 B,如图 3 中插图所示,其高度和宽度分别为  $h$  和  $W$ ,其中,  $W$  选择硅基波导的常见宽度

500 nm<sup>[17-18]</sup>,而通过仿真优化后确定  $h$  值为 350 nm。仿真结果表明,  $h$  较小时,存在通过调节  $n(\text{SiN}_x)$  无法实现偏振无关或无法使得波长分离的情况,而  $h$  较大不利于集成。输入和输出波导均由条形波导构成,其高度和宽度与耦合区内 DC 波导一致;其中 port3 端口处输出波导连接 S 波导,其长度和宽度分别为  $L_s=10 \mu\text{m}$  和  $W_s=3 \mu\text{m}$ 。此外,器件的设计是基于 SOI 平台,DC 波导采用硅材料,其折射率为 3.48,并覆盖了 2  $\mu\text{m}$  厚的 SiO<sub>2</sub> 材料。

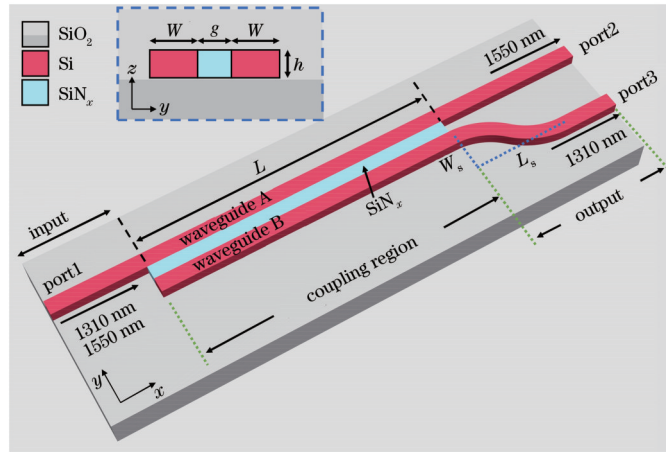


图 3 DC 型解复用器结构示意图(插图为耦合区波导截面图)

Fig. 3 Configuration of DC demultiplexer structure (inset is section view of coupled zone waveguide)

### 3 器件功能实现与性能分析

#### 3.1 器件功能实现与参数优化

由式(3)、(4)可知,  $L_{c,TE}(\lambda)$  和  $L_{c,TM}(\lambda)$  与其在波导中偶模和奇模的有效折射率密切相关,因此通过合理选择 DC 波导间隙中填充材料 SiN<sub>x</sub> 的折射率<sup>[27]</sup>,即可调整 TE 和 TM 偏振模的有效折射率,从而实现对其  $L_{c,TE}(\lambda)$  和  $L_{c,TM}(\lambda)$  的调控,并使二者相等,进而实现器件的偏振无关。

下面分析当参数  $W=500 \text{ nm}$ 、 $h=350 \text{ nm}$ 、 $W_s=3 \mu\text{m}$  和  $L_s=10 \mu\text{m}$  保持不变,以  $g$  分别为 120 nm 和 160 nm 时为例,不同波长、不同偏振模所对应的  $L_c$  随  $n(\text{SiN}_x)$  的变化关系。由图 4(a)、(b)可知:随着  $g$  的增大,不同波长、不同偏振模所对应的  $L_c$  均随之增大。当  $g$  固定不变时,不同波长、不同偏振模所对应的  $L_c$  均随着  $n(\text{SiN}_x)$  的增大而单调减小,且  $L_{c,TE}(\lambda)$  减小的幅度要大于  $L_{c,TM}(\lambda)$ ,所以二者存在交点(图 4 中椭圆圈标识处),此时  $L_{c,TE}(\lambda)=L_{c,TM}(\lambda)$ ,满足偏振无关条件。值得注意的是,当  $g$  固定,对于不同的波长,存在相同

的  $n(\text{SiN}_x)$  令器件满足偏振无关的条件。

通过上述讨论可知,当  $g$  固定时,通过调节  $n(\text{SiN}_x)$  的大小,可以实现器件的偏振无关。下面需要讨论当  $g$  取任意值时,器件是否都能实现偏振无关性。考虑到实际中  $g$  太小不利于制作<sup>[30-31]</sup>且对制造容差敏感,而  $g$  太大影响耦合,所以本文将  $g$  的取值范围限制在 100~240 nm。按照上文所述方法,固定参数  $W=500 \text{ nm}$ 、 $h=350 \text{ nm}$ 、 $W_s=3 \mu\text{m}$  和  $L_s=10 \mu\text{m}$  不变,通过变化  $g$  的大小,寻找合适的  $n(\text{SiN}_x)$ ,使  $L_{c,TE}(1310)=L_{c,TM}(1310)$  和  $L_{c,TE}(1550)=L_{c,TM}(1550)$  同时成立。仿真数据表明: $g$  在 100~240 nm 范围内取任意值,都可以找到合适的  $n(\text{SiN}_x)$ ,使得器件实现偏振无关性,其结果如图 5 所示。并且从图 5 中可见,  $n(\text{SiN}_x)$  随着  $g$  的增大而增大。

实现器件偏振无关后,需要对输入的两个波长进行分离,这要求 1310 nm 和 1550 nm 波长光信号所对应的耦合长度  $L_c(1310)$  和  $L_c(1550)$  满足<sup>[16]</sup>:

$$mL_c(1310)=(m+q)L_c(1550), \quad (5)$$

式中: $m$  为正整数; $q$  为正奇数。此时耦合区波导长度



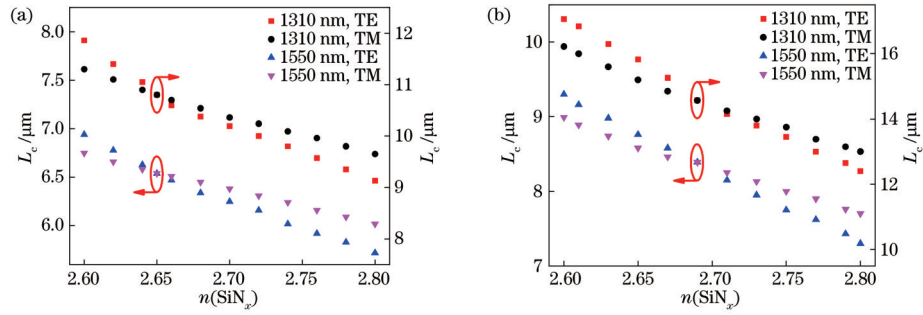


图 4 当  $g$  为 120 nm 和 160 nm 时  $L_c$  随  $n(\text{SiN}_x)$  的变化。(a)  $g=120$  nm; (b)  $g=160$  nm  
Fig. 4  $L_c$  as a function of  $n(\text{SiN}_x)$  when  $g$  is 120 nm and 160 nm. (a)  $g=120$  nm; (b)  $g=160$  nm

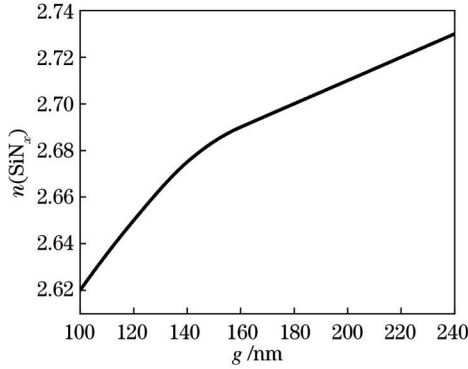


图 5 器件偏振无关时,  $g$  随  $n(\text{SiN}_x)$  的变化关系图  
Fig. 5  $g$  as a function of  $n(\text{SiN}_x)$  when demultiplexer is polarization-independent

$L$  恰好为其中一个波长光信号耦合长度的偶数倍, 且是另一个波长光信号耦合长度的奇数倍, 即其中一个光信号将在波导中耦合偶数次, 另一个光信号则耦合奇数次, 两个信号最终从不同的输出端口输出, 实现分离。为了便于讨论, 引入耦合长度比  $R = \frac{L_c(1310)}{L_c(1550)} = \frac{m+q}{m}$ , 只需找到合适的  $m$  和  $q$ , 就能分离两个波长。

图 5 给出偏振无关时  $g$  随  $n(\text{SiN}_x)$  的变化, 采用其中一一对应的  $g$  和  $n(\text{SiN}_x)$ , 分析  $L_c(1310)$  和  $L_c(1550)$  分别随  $g$  的变化。由图 6(a) 可知:  $L_c(1310)$  和  $L_c(1550)$  均随着  $g$  的增大而增大, 并且  $L_c(1310)$  的变化幅度大于  $L_c(1550)$ , 这为波长的分离提供了条件。由图 6(b) 可知:  $R$  随着  $g$  的增大而增大, 并且在  $g$  值较大时增长较快。当  $g$  在 100~240 nm 范围内变化时,  $R$  的变化范围为 1.6~2.1。任取一个正整数  $m$ , 如  $m=7$ 。当  $m \leq 7$  时, 找出所有  $m$  和  $q$  的组合, 令  $R$  的范围限制于 1.6~2.1, 满足要求的  $m$  和  $q$  组合如图 6(c) 所示, 还计算出了每种组合下所对应的  $L$ , 可见: 当  $R=2$  ( $m=q=1$ ) 时,  $L$  取得最小值 23.4  $\mu\text{m}$ 。而当  $m > 7$  时, 同样可以找到若干  $m$  和  $q$  的组合, 令  $R$  的范围限制于 1.6~2.1。但是, 因为  $L=mL_c(1310)$ , 由图 6(a) 可知, 其乘积大于 23.4  $\mu\text{m}$ 。由此可知,  $g$  在 100~240 nm 范围内变化且  $m=q=1$  时  $L=23.4$   $\mu\text{m}$  为最小值, 此时  $g=220$  nm,  $n(\text{SiN}_x)=2.72$ , 实现了波长分离。

由上文可知, 当  $L$  选择 23.4  $\mu\text{m}$  时, 1310 nm 和 1550 nm 波长在耦合区中实现完全分离, 为了使其解耦输出, 在波导 B 后引入 S 波导用于连接 port3 端口。然而由于 S 波导与波导 A 之间还存在耦合, 所以实际上此时光信号在器件中耦合的距离大于 23.4  $\mu\text{m}$ , 这使 1310 nm 和 1550 nm 波长在完全分离后又有一部分能量重新耦合至另一波导中, 对结果造成负面影响。因此下面结合器件输出性能进行分析, 以找到光信号分离性能最佳时的  $L$ 。为了更直观地表达器件的输出性能, 引入对解复用器最重要的指标 IL 和 CT, 其定义分别为

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

$$C_{\text{T}} = 10 \lg(P_{\text{u}}/P_{\text{d}}), \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{in}}$  为输入波导中的功率;  $P_{\text{d}}$  和  $P_{\text{u}}$  分别为目标输出波导和非目标输出波导中的输出功率。对于 1310 nm 波长,  $P_{\text{d}}$  和  $P_{\text{u}}$  分别为  $P_{\text{port3}}$  和  $P_{\text{port2}}$ ; 而对于 1550 nm 波长,  $P_{\text{d}}$  和  $P_{\text{u}}$  则分别为  $P_{\text{port2}}$  和  $P_{\text{port3}}$ , 其中,  $P_{\text{port2}}$  和  $P_{\text{port3}}$  分别为 port3 和 port2 端口的输出功率<sup>[32]</sup>, 可表示为

$$P_{\text{port2}} = \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L}{L_c}\right) P_{\text{in}}, \quad (8)$$

$$P_{\text{port3}} = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L}{L_c}\right) P_{\text{in}} \quad (9)$$

图 7(a)、(b) 分别为当参数  $W=500$  nm、 $h=350$  nm、 $W_s=3$   $\mu\text{m}$ 、 $L_s=10$   $\mu\text{m}$ 、 $g=220$  nm 以及  $n(\text{SiN}_x)=2.72$  时,  $L_{\text{IL}}$  和  $C_{\text{T}}$  随  $L$  的变化,  $L$  的取值在 23.4  $\mu\text{m}$  附近。由图 7 可见: 1550 nm 波长下 TE 偏振模的  $L_{\text{IL}}$  和  $C_{\text{T}}$  均受  $L$  的影响较大, 会随着  $L$  的增加大幅度增加; 而 1550 nm 波长下的 TM 偏振模和 1310 nm 波长下的 TE 和 TM 偏振模所对应的  $L_{\text{IL}}$  和  $C_{\text{T}}$  随着  $L$  的变化均较为平缓地变化。综合考虑, 选择  $L$  为 22.8  $\mu\text{m}$  (图 7 中椭圆圈标识), 此时器件输出性能最佳, 1310 nm 波长 TE(TM) 偏振模的  $L_{\text{IL}}$  和  $C_{\text{T}}$  分别为 0.13 dB (0.05 dB) 和 -19.69 dB (-21.58 dB), 1550 nm 波长 TE(TM) 偏振模的  $L_{\text{IL}}$  和  $C_{\text{T}}$  分别为 0.14 dB (0.11 dB) 和 -17.61 dB (-18.07 dB)。

考虑到 S 波导对器件的输出性能会有一些的影响, 因此需要分析  $W_s$  和  $L_s$  的取值对  $\bar{L}_{\text{IL}}$  和  $\bar{C}_{\text{T}}$  的影响, 其中,  $\bar{L}_{\text{IL}}$  和  $\bar{C}_{\text{T}}$  分别为 TE 偏振模和 TM 偏振模的平均

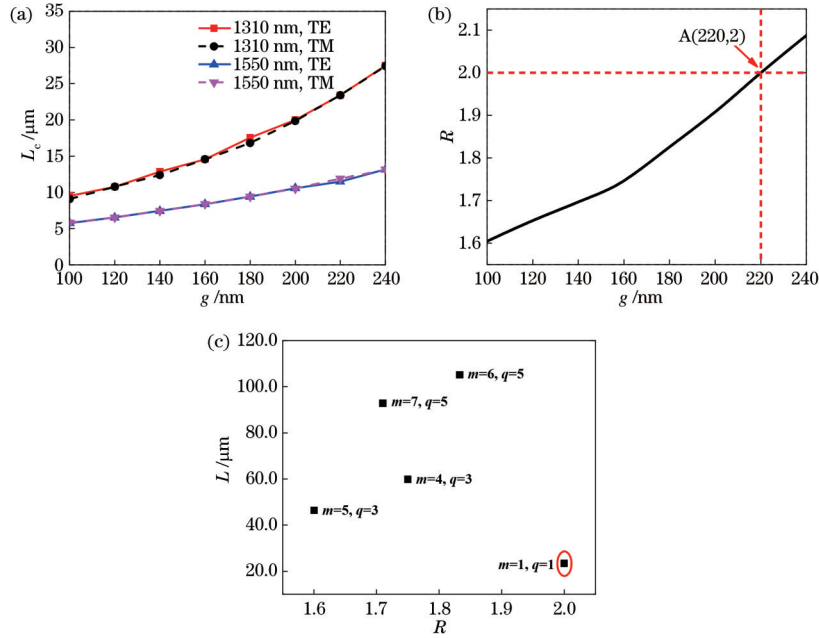


图 6 偏振无关时, 1550 nm 和 1310 nm 波长的  $L_c$  和  $R$  随  $g$  的变化, 以及当  $m < 7$  时  $L$  随  $R$  的变化。(a)  $L_c$  随  $g$  的变化; (b)  $R$  随  $g$  的变化; (c)  $L$  随  $R$  的变化

Fig. 6  $L_c$  and  $R$  of 1550 nm and 1310 nm optical signals as functions of  $g$  when demultiplexer is polarization-independent, and  $L$  as a function of  $R$  when  $m$  is less than 7. (a)  $L_c$  as a function of  $g$ ; (b)  $R$  as a function of  $g$ ; (c)  $L$  as a function of  $R$

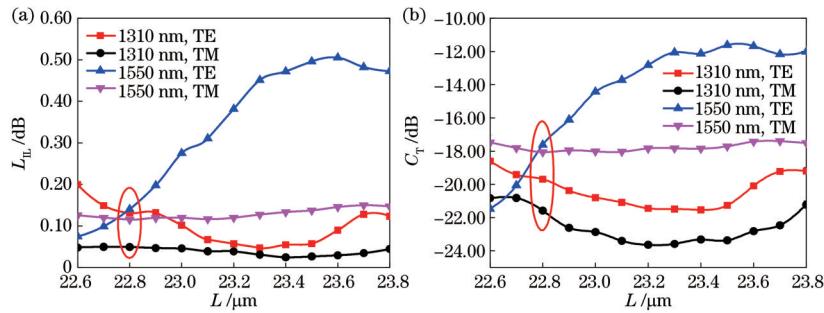


图 7  $L_{IL}$  和  $C_T$  随  $L$  的变化。(a)  $L_{IL}$ ; (b)  $C_T$

Fig. 7  $L_{IL}$  and  $C_T$  as functions of  $L$ . (a)  $L_{IL}$ ; (b)  $C_T$

$L_{IL}$  和  $C_T$ 。固定  $W=500$  nm、 $h=350$  nm、 $g=220$  nm 和  $n(\text{SiN}_x)=2.72$  不变, 然后改变  $W_s$  和  $L_s$  的值, 观察其对器件性能的影响, 结果如图 8 所示。当  $W_s$  在  $2.0 \sim 4.0$   $\mu\text{m}$ 、 $L_s$  在  $8 \sim 12$   $\mu\text{m}$  范围内变化时, 器件  $\bar{L}_{IL}$

和  $\bar{C}_T$  均会随之改变, 但是变化并不明显, 即器件性能受 S 波导的影响较小。当综合考虑器件的  $\bar{L}_{IL}$  和  $\bar{C}_T$  时, 最佳  $W_s$  和  $L_s$  分别为  $3.0$   $\mu\text{m}$  和  $10$   $\mu\text{m}$ , 此时器件的  $\bar{L}_{IL}$  和  $\bar{C}_T$  分别为  $0.110$  dB 和  $-19.24$  dB。

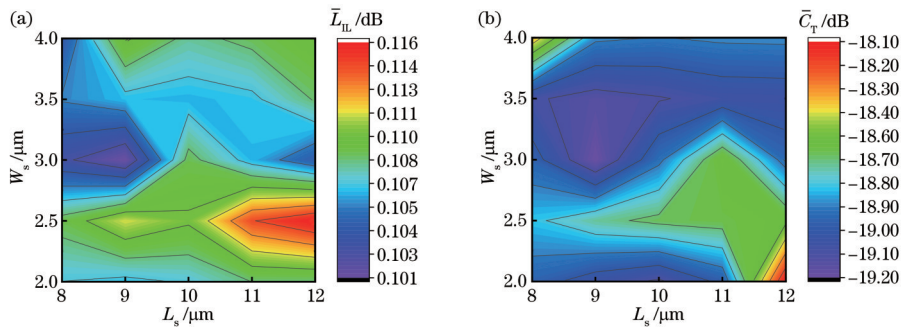


图 8  $\bar{L}_{IL}$  和  $\bar{C}_T$  随  $W_s$  和  $L_s$  的变化。(a)  $\bar{L}_{IL}$ ; (b)  $\bar{C}_T$

Fig. 8  $\bar{L}_{IL}$  and  $\bar{C}_T$  as functions of  $W_s$  and  $L_s$ . (a)  $\bar{L}_{IL}$ ; (b)  $\bar{C}_T$

综上所述,当参数选择为  $W=500\text{ nm}$ 、 $h=350\text{ nm}$ 、 $W_s=3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $L_s=10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $g=220\text{ nm}$ 、 $n(\text{SiN}_x)=2.72$  以及  $L=22.8\text{ }\mu\text{m}$  时,实现了 DC 型偏振无关解复用器,并且输出性能达到最佳。此时两个波长所对应正交偏振模的传播光场分布如图 9 所示:1310 nm 光信

号经长度为  $L$  的耦合区,从波导 A 耦合至波导 B,由 S 波导从 port3 端口输出;而 1550 nm 光信号先从波导 A 耦合至波导 B,然后从波导 B 耦合回波导 A,由 port2 端口输出。所设计的解复用器成功地分离了 1310 nm 和 1550 nm 波长的光信号,并且偏振无关。

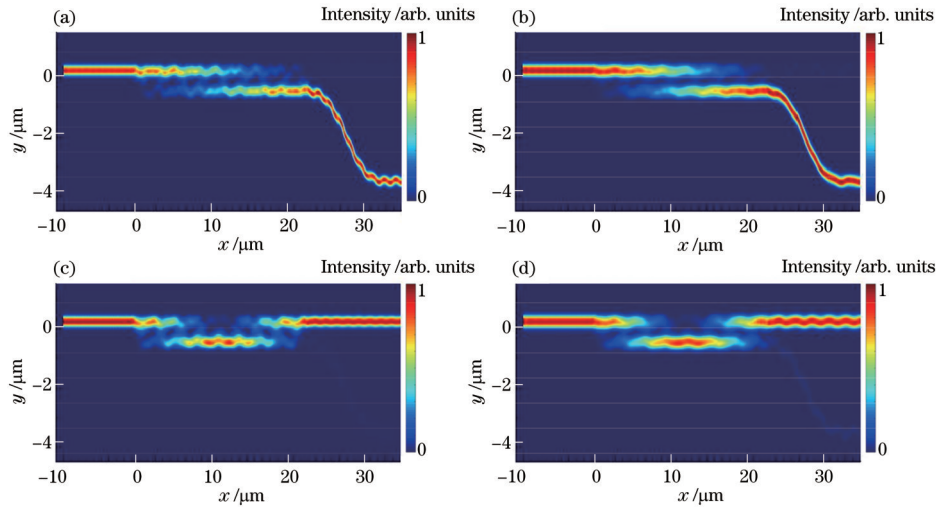


图 9 DC 型偏振无关解复用器的传播光场分布图。(a) 1310 nm, TE 偏振模;(b) 1310 nm, TM 偏振模;(c) 1550 nm, TE 偏振模;(d) 1550 nm, TM 偏振模

Fig. 9 Field distributions of DC polarization-independent demultiplexer. (a) 1310 nm, TE polarization mode; (b) 1310 nm, TM polarization mode; (c) 1550 nm, TE polarization mode; (d) 1550 nm, TM polarization mode

为了更好地说明所提出器件的性能优势,如表 1 所示,与已报道的偏振无关型解复用器进行了性能参数比较。虽然 AWG 型、PC 型和 MZI 型结构常被用于解复用器的设计中,但是未见基于该类结构的 1310 nm/1550 nm 偏振无关解复用器的报道,故未纳入表中。由表 1 可知:与 MMI 型偏振无关解复用器相比,本文结构尺寸更小,  $\bar{L}_{IL}$  更优;而与同类的 DC 型偏振无关解复用器相比,虽然  $\bar{C}_T$  略有不足,但尺寸和  $\bar{L}_{IL}$  远小于其他结构,具有一定的优势。

表 1 偏振无关解复用器性能参数的比较

Table 1 Comparison of performance parameters of polarization-independent demultiplexers

Demultiplexer	Structure	Size / $\mu\text{m}^2$	$\bar{L}_{IL}$ / dB	$\bar{C}_T$ / dB
Ref. [8]	MMI	10.00×360.00	0.410	-23.00
Ref. [9]	MMI	4.60×227.70	0.365	-23.10
Ref. [12]	DC	1.68×23.00	0.335	-23.24
Ref. [17]	DC	1.24×48.20	0.225	-21.25
Our work	DC	1.22×22.80	0.110	-19.24

### 3.2 器件带宽与容差分析

上文已实现了 DC 型偏振无关解复用器,耦合区长度仅为  $22.8\text{ }\mu\text{m}$ ,  $L_{IL}$  和  $C_T$  分别低至 0.05 dB 和 -21.58 dB。实际中,光源并不是单色光,因此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 带宽衡量其带宽特性。图 10(a)、(b) 分别

为 1310 nm 和 1550 nm 波段归一化输出功率随波长的变化。由图 10(a) 可知,在 1161~1433 nm 波段范围内, port3 端口的输出功率都能保持在 50% 以上,即对于 1310 nm 波长,3 dB 带宽达到了 272 nm。同理,由图 10(b) 可以得出,1550 nm 波长的 3 dB 带宽达到了 177 nm (1455~1632 nm)。而在实际应用中,  $C_T$  是必须考虑的指标,如图 10(c) 中 1310 nm 波段和图 10(d) 中 1550 nm 波段  $C_T$  随波长的变化关系图中所示,  $C_T$  (TE) 和  $C_T$  (TM) 均小于 -10 dB 的带宽达到了 79 nm (1278~1357 nm) 和 55 nm (1521~1576 nm)。

本文所提出的 DC 型偏振无关解复用器采用常见的 SOI 平台,其硅波导部分可利用标准光刻和蚀刻技术实现,  $\text{SiN}_x$  部分可利用 PECVD 方法实现。但是实际制造中会存在一定的工艺误差,对器件输出性能产生影响。下面对影响器件输出性能的参数  $h$ 、 $W$ 、 $g$  和  $n$  ( $\text{SiN}_x$ ) 进行容差分析,观察  $h$  的偏差值  $\Delta h$ 、 $W$  的偏差值  $\Delta W$ 、 $g$  的偏差值  $\Delta g$  以及  $n$  ( $\text{SiN}_x$ ) 的偏差值  $\Delta n$  ( $\text{SiN}_x$ ) 分别对器件  $L_{IL}$  和  $C_T$  的影响。由图 11(a) 可知:当  $\Delta h$  在 -30~30 nm 之间变化,不同波长所对应 TE 和 TM 偏振模的  $L_{IL}$  和  $C_T$  均分别小于 0.70 dB 和 -10.00 dB,输出性能良好。由图 11(b) 可知:当  $\Delta W$  在 -12.5~15.0 nm 之间变化时,器件  $L_{IL}$  与  $C_T$  仍分别小于 0.60 dB 和 -10.00 dB,器件对  $W$  的容差性较好。由图 11(c) 可知: $\Delta g$  在 -12~12 nm 之间变化,仍能保持  $L_{IL}$  小于 0.62 dB,  $C_T$  小于 -10.00 dB,容差性良好。如图 11(d) 所示: $\Delta n$  ( $\text{SiN}_x$ ) 在 -0.05~0.05 范围内变化时,器件  $L_{IL}$  与  $C_T$  分别小于 0.60 dB 和 -10.00 dB。



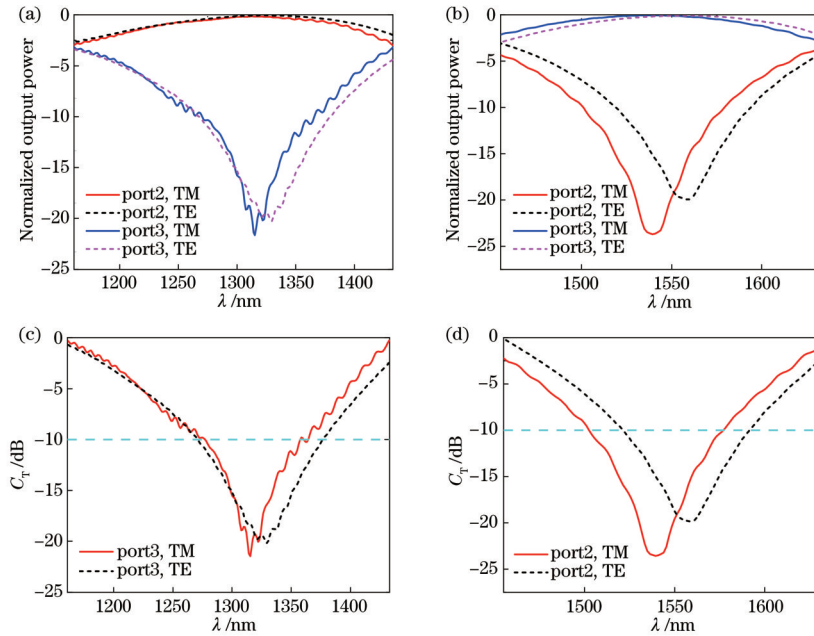


图 10 port2 和 port3 端口的归一化输出功率和  $C_T$  随波长的变化。(a) 1310 nm 波段, 归一化输出功率; (b) 1550 nm 波段, 归一化输出功率; (c) 1310 nm 波段,  $C_T$ ; (d) 1550 nm 波段,  $C_T$

Fig. 10 Normalized output power and  $C_T$  for port2 and port3 as functions wavelength. (a) 1310 nm band, normalized output power; (b) 1550 nm band, normalized output power; (c) 1310 nm band,  $C_T$ ; (d) 1550 nm band,  $C_T$

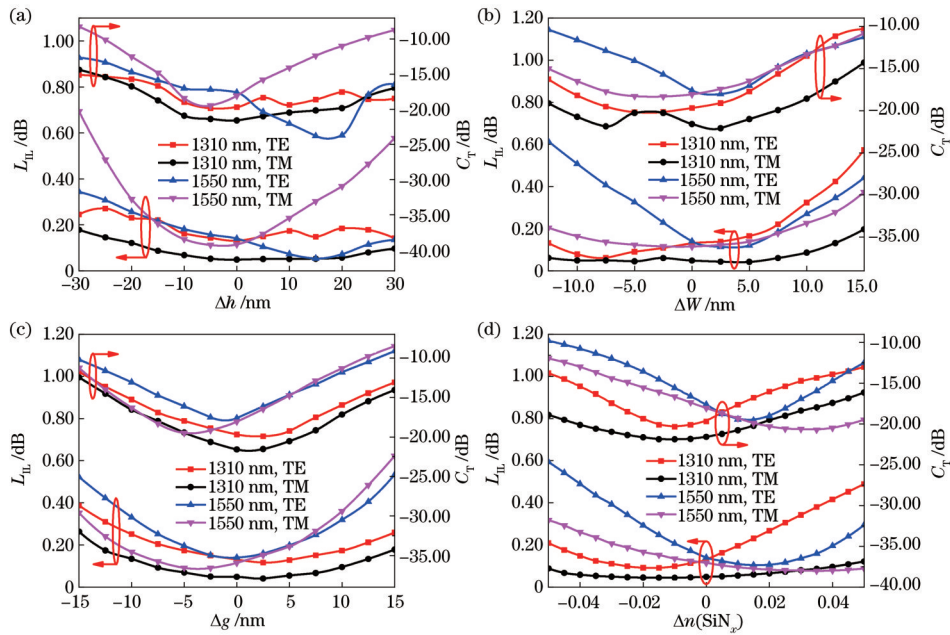


图 11  $L_{IL}$  和  $C_T$  随  $\Delta h$ 、 $\Delta W$ 、 $\Delta g$  以及  $\Delta n(\text{SiN}_x)$  的变化关系。(a)  $\Delta h$ ; (b)  $\Delta W$ ; (c)  $\Delta g$ ; (d)  $\Delta n(\text{SiN}_x)$

Fig. 11  $L_{IL}$  and  $C_T$  as functions of  $\Delta h$ ,  $\Delta W$ ,  $\Delta g$ , and  $\Delta n(\text{SiN}_x)$ . (a)  $\Delta h$ ; (b)  $\Delta W$ ; (c)  $\Delta g$ ; (d)  $\Delta n(\text{SiN}_x)$

综上,该器件对  $h$ 、 $W$ 、 $g$  具有良好的容差性,对  $n(\text{SiN}_x)$  的制造误差有一定的敏感性,但在双波长解复用器的适用范围内。

## 4 结 论

提出了一种基于  $\text{SiN}_x$  填充的 DC 型偏振无关解复用器,在传统 DC 波导的间隙内填充  $\text{SiN}_x$  材料,通过调节  $n(\text{SiN}_x)$ ,使同一波长下两个正交偏振模的  $L_c$  相等,

实现偏振无关功能。分析了在不同  $g$  时,  $L_c$  随  $n(\text{SiN}_x)$  的变化。其次,对波长的分离进行讨论,分析了偏振无关条件下,耦合长度比  $R$  随  $g$  的变化,以及器件插入损耗  $L_{IL}$  与串扰  $C_T$  随耦合区长度  $L$  的变化。对于不同的  $g$ ,存在满足偏振无关条件的  $n(\text{SiN}_x)$ ,并且当参数选择  $W=500$  nm、 $h=350$  nm、 $W_s=3$   $\mu\text{m}$ 、 $L_s=10$   $\mu\text{m}$ 、 $g=220$  nm、 $n(\text{SiN}_x)=2.72$  和  $L=22.8$   $\mu\text{m}$  时,实现了偏振无关的解复用功能。最后对器件进行了性能和容差

性的分析,结果表明:所设计的偏振无关解复用器耦合区长度仅为  $22.8 \mu\text{m}$ ,  $L_{IL}$  和  $C_T$  分别低至  $0.05 \text{ dB}$  和  $-21.58 \text{ dB}$ ,  $C_T$  小于  $-10 \text{ dB}$  的带宽可达  $79 \text{ nm}$ , 且器件总体容差性较好。此外,由文献[33]可知,工艺上能够实现同一层同时沉积 Si 和  $\text{SiN}_x$  材料,所提器件具有可实现性,在未来的集成光路系统中具有潜在的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Winzer P J. Making spatial multiplexing a reality[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(5): 345-348.
- [2] Hibino Y. Recent advances in high-density and large-scale AWG multi/demultiplexers with higher index-contrast silica-based PLCs[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(6): 1090-1101.
- [3] Sivasindhu M, Samundiswary P. Design and performance analysis of an ultra-compact 2-channel optical MUX/DEMUX based on PCW defects[C]//2019 TEQIP III Sponsored International Conference on Microwave Integrated Circuits, Photonics and Wireless Networks (IMICPW), May 22-24, 2019, Tiruchirappalli, India. New York: IEEE Press, 2019: 250-254.
- [4] Walker R G, Urquhart J, Bennion I, et al.  $1.3/1.53 \mu\text{m}$  Mach-Zehnder wavelength duplexers for integrated optoelectronic transceiver modules[J]. *IEE Proceedings J (Optoelectronics)*, 1990, 137(1): 33-38.
- [5] Zhang S C, Ji W, Yin R, et al. Full bandwidth wavelength division multiplexer/demultiplexer based on MMI[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(1): 107-110.
- [6] Triki S, Najjar M, Rezig H. Optimization of MMI-WDM demultiplexer by using BPM method[C]//2007 ICTON Mediterranean Winter Conference, December 6-8, 2007, Sousse, Tunisia. New York: IEEE Press, 2007.
- [7] Fujisawa T, Koshiha M. Theoretical investigation of ultrasmall polarization-insensitive  $1 \times 2$  multimode interference waveguides based on sandwiched structures [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(11): 1246-1248.
- [8] Shi Y, Anand S, He S. A polarization-insensitive  $1310/1550\text{-nm}$  demultiplexer based on sandwiched multimode interference waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(22): 1789-1791.
- [9] 汪静丽, 陈子玉, 陈鹤鸣. 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[J]. *物理学报*, 2020, 69(5): 054206.  
Wang J L, Chen Z Y, Chen H M. 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[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(5): 054206.
- [10] Song J H, Kim K Y, Cho J, et al. Thin film filter-embedded triplexing-filters based on directional couplers for FTTH networks[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(8): 1668-1670.
- [11] Ganguly P, Biswas J C, Lahiri S K. Analysis of Ti:LiNbO<sub>3</sub> zero-gap directional coupler for wavelength division multiplexer/demultiplexer[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(12): 3269-3274.
- [12] 汪静丽, 陈子玉, 陈鹤鸣. 基于夹层结构的偏振无关  $1 \times 2$  定向耦合型解复用器的设计[J]. *物理学报*, 2021, 70(1): 014202.  
Wang J L, Chen Z Y, Chen H M. Design of polarization-insensitive  $1 \times 2$  directional coupler demultiplexer based on sandwiched structure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(1): 014202.
- [13] Shockley W. The path to the conception of the junction transistor[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1976, 23(7): 597-620.
- [14] Gupta R K, Chandran S, Krishna B. Integrated silicon photonics directional couplers for WDM applications[C]//2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP), February 9-11, 2018, Dhanbad, India. New York: IEEE Press, 2018.
- [15] Xu H N, Shi Y C. On-chip silicon triplexer based on asymmetrical directional couplers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(15): 1265-1268.
- [16] Chen J Y, Liu L, Shi Y C. A polarization-insensitive dual-wavelength multiplexer based on bent directional couplers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(22): 1975-1978.
- [17] Shi Y C, Anand S, He S L. Design of a polarization insensitive triplexer using directional couplers based on submicron silicon rib waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(11): 1443-1447.
- [18] Chen Y F, Xiao J B. Compact silicon-based polarization-independent directional coupler using subwavelength gratings[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(27): 7430-7435.
- [19] Liu L, Deng Q Z, Zhou Z P. Subwavelength-grating-assisted broadband polarization-independent directional coupler[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1648-1651.
- [20] Xie H, Zheng J J, Xu P P, et al. Ultra-compact subwavelength-grating-assisted polarization-independent directional coupler[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(18): 1538-1541.
- [21] Xiao J B, Liu X, Sun X H. Design of polarization-independent optical couplers composed of three parallel slot waveguides[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(14): 2687-2695.
- [22] Fujisawa T, Koshiha M. Polarization-independent optical directional coupler based on slot waveguides[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(1): 56-58.
- [23] Liu D J, Dai D X. Silicon-based polarization-insensitive optical filter with dual-gratings[J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20704-20710.
- [24] Chen Y, Joines W T. Enhanced WDM performance using curved waveguide couplers[J]. *Optics Communications*, 2003, 228(4/5/6): 319-330.
- [25] Xie H, Zheng J J, Xu P P, et al. Ultra-compact subwavelength-grating-assisted polarization-independent directional coupler[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(18): 1538-1541.



- [26] Lee C C, Chen H L, Hsu J C, et al. Interference coatings based on synthesized silicon nitride[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(10): 2078-2082.
- [27] Guler I. Optical and structural characterization of silicon nitride thin films deposited by PECVD[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2019, 246: 21-26.
- [28] Wang Q F, Liu S, Tang H H, et al. Study on a-Si:H and SiN<sub>x</sub> films for tunable filter[C]//2016 25th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), May 21-23, 2016, Chengdu. New York: IEEE Press, 2016.
- [29] Wang Z C, Dai D X, He S L. Polarization-insensitive ultrasmall microring resonator design based on optimized Si sandwich nanowires[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(20): 1580-1582.
- [30] Mao D, Wang Y, El-Fiky E, et al. Adiabatic coupler with design-intended splitting ratio[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(24): 6147-6155.
- [31] Xu L H, Wang Y, Kumar A, et al. Compact high-performance adiabatic 3-dB coupler enabled by subwavelength grating slot in the silicon-on-insulator platform[J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 29873-29885.
- [32] Wang Q, He S L. A simple, fast and accurate method of designing directional couplers by evaluating the phase difference of local supermodes[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2003, 5(5): 449-452.
- [33] Chatterjee A, Yadav S, Sikdar S K, et al. Compact ring resonator enhanced silicon metal-semiconductor-metal photodetector in SiN-on-SOI platform[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 33644-33655.