

基于亚波长光栅和三明治结构的偏振无关微环谐振器的设计与仿真

汪静丽 张见哲 陈鹤鸣

Design and simulation of polarization-insensitive ring resonator based on subwavelength grating and sandwiched structure

Wang Jing-Li Zhang Jian-Zhe Chen He-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 124201 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201965

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201965>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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 1×2 多模干涉型解复用器的设计

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

物理学报. 2020, 69(5): 054206 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191449>

一种基于金刚石多层波导结构微环谐振器的仿真分析

Simulation analysis of micro-ring resonator based on diamond multilayer waveguide structure

物理学报. 2017, 66(20): 204203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.204203>

三明治结构graphene-2Li-graphene的储氢性能

Hydrogen storage capacity of expanded sandwich structure graphene-2Li-graphene

物理学报. 2019, 68(5): 053601 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181497>

金属开口环谐振器超构分子中二次谐波偏振态的调控

Polarization state of second harmonic generation in split ring resonator based meta-molecule

物理学报. 2019, 68(21): 214205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190837>

基于光栅结构的远场时间反演亚波长源成像

Far-field time reversal subwavelength imaging of sources based on grating structure

物理学报. 2017, 66(4): 044101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.044101>

外磁场与带轴夹角对非晶 $\text{FeSiB}/\text{Cu}/\text{FeSiB}$ 三明治薄带巨磁阻抗特性的影响

Effects of the angle between magnetic field and ribbon axis on the magneto-impedance properties of amorphous $\text{FeSiB}/\text{Cu}/\text{FeSiB}$ sandwiched ribbon

物理学报. 2019, 68(6): 067501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181806>

基于亚波长光栅和三明治结构的偏振无关微环谐振器的设计与仿真*

汪静丽^{1)†} 张见哲¹⁾ 陈鹤鸣²⁾

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)

(2020 年 11 月 21 日收到; 2021 年 1 月 12 日收到修改稿)

基于绝缘体上硅的微环谐振器由于成本低、结构紧凑和集成度高等优点, 是构成波分复用器、调制器以及光开关等的核心器件. 然而, 该类器件由于芯层与覆盖层间的高折射率差, 具有较大的偏振相关性, 在诸多使用偏振无关器件的应用中受到限制. 本文基于亚波长光栅和三明治结构设计了一种偏振无关微环谐振器, 通过改变三明治结构中低折射率层 SiN_x 的折射率, 同时结合耦合区亚波长光栅的结构参数优化, 最终消除微环谐振器的偏振相关性. 运用三维有限时域差分法进行建模仿真, 对器件的结构参数进行了优化. 结果表明, 器件在 TE 和 TM 偏振模时的 3-dB 带宽均小于 0.8 nm, 插入损耗均小于 0.8 dB, 微环半径仅为 10 μm , 并且在谐振波长 1552.26 nm 附近的两个自由频谱区内实现了偏振无关. 与常见的微环谐振器相比, 本文所提出的器件尺寸小、损耗低, 可用于构成偏振无关的密集波分复用器, 在未来的集成光路中具有较高的应用价值.

关键词: 微环谐振器, 偏振无关, 亚波长光栅, 三明治结构**PACS:** 42.79.-e, 42.82.-m**DOI:** 10.7498/aps.70.20201965

1 引言

在大数据时代, 现代网络通信和人工智能等热点技术兴起, 对信道容量的需求日益突出, 密集波分复用技术应运而生. 密集波分复用器作为其核心器件, 常用的实现方法有: 微环谐振器^[1–3]、阵列波导光栅^[4]、级联马赫-曾德尔干涉仪^[5]和光子晶体^[6]. 其中, 由于微环谐振器拓扑多样, 滤波性能好且与绝缘体上硅 (silicon-on-insulator, SOI) 技术兼容而备受关注.

SOI 是指在绝缘体衬底 (SiO_2 等) 上形成 Si 波导或 Si 薄膜, 是一种新型的光电子集成材料. 由于 Si 与 SiO_2 材料间折射率差较大, 对光的限制能

力强, 弯曲损耗低^[7,8], 因此基于 SOI 的微环谐振器的弯曲半径较小, 具有更高的集成度^[9]. 但是由于 SOI 固有的双折射效应, 导致基于 SOI 的微环谐振器往往有着很强的偏振相关性, 使其在诸多使用偏振无关器件的应用中受到限制. 目前有两种解决方案: 一种方案是使用偏振分集系统^[10]; 另一方案是使所设计的器件本身具有偏振无关性. 本文拟采用后者, 设计偏振无关的微环谐振器.

目前, 已报道的实现 SOI 型微环谐振器偏振无关的方法有: 1) 采用脊型多模干涉波导, 但存在自由频谱区 (free spectral range, FSR) 较小以及器件尺寸较大等问题^[11]; 2) 采用十字缝隙波导, 器件尺寸较小, 但插入损耗较大^[12]; 3) 采用亚波长光栅 (subwavelength grating, SWG) 与梯形波导,

* 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) 和南京邮电大学校级科研基金 (批准号: NY217047) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jlwang@njupt.edu.cn

器件 Q 值较高且插入损耗小于 2 dB, 但尺寸较大不利于集成^[13]. 综上, 现有的偏振无关微环谐振器在插入损耗与器件尺寸两者兼顾中存在不足.

针对上述问题, 本文提出一种基于 SWG 和三明治结构的偏振无关微环谐振器. 通过改变三明治结构中低折射率层 SiN_x 的折射率, 优化耦合区 SWG 的结构参数, 可以实现偏振无关. 运用三维有限时域差分法进行建模和分析, 结果表明: 器件尺寸较小且插入损耗较低, 同时在谐振波长 1552.26 nm 附近的两个 FSR 内实现了偏振无关, 3-dB 带宽小于 0.8 nm, 可用于信道间隔为 0.8 nm 的密集波分复用器.

2 工作原理与器件结构的设计

2.1 微环谐振器原理

根据耦合模理论^[14], 当上传/下载型微环谐振器^[15]的微环波导与输入、输出波导之间的距离足够近时, 输入光将通过输入波导芯层外的消逝场不断地耦合进入微环波导, 其中满足谐振条件的光将发生相干干涉, 并很快地达到稳定状态, 从输出端输出. 微环谐振器的谐振条件为

$$2\pi R n_{\text{eff}} = m\lambda, \quad (1)$$

其中 m 为微环谐振器的谐振级数, 取正整数; R 为微环半径; λ 为谐振波长; n_{eff} 为微环波导的模式

有效折射率.

反之, 不满足谐振条件的光则不发生干涉, 其大部分从直通端输出, 余下的一小部分则由输出端以背景光的形式输出.

根据耦合模理论, 可以推导出输出端的光强度为^[16]

$$|D|^2 = \left| \frac{k_1 k_2 \exp[-j(\phi + 2\varphi)]}{1 - t_1 t_2 \exp(-2j\varphi)} \right|^2, \quad (2)$$

其中 ϕ 为光在微环中传输半圈时产生的相移; φ 为光从输入端开始直到耦合进入微环中时产生的相移; k_1, k_2 为微环与输入、输出波导的振幅耦合系数, 相应的振幅透射系数为 t_1, t_2 . 振幅耦合系数与振幅透射系数满足:

$$k_n^2 + t_n^2 = 1, n = (1, 2). \quad (3)$$

2.2 器件结构的设计

所设计的基于 SWG 和三明治结构的微环谐振器结构如图 1(a) 所示, 该器件由输入、输出波导与微环波导组成. 器件中除 SWG 外的波导宽度均为 $W_1 = 0.5 \mu\text{m}$, 满足单模条件; 微环波导中弯曲波导半径为 $R = 10 \mu\text{m}$ (R 过小, 弯曲损耗过大; R 过大, 则 FSR 过小, 影响波分复用的性能, 故 R 的取值兼顾了两者); 输入、输出波导与微环波导间的间隔均为 g . 此外, 器件中的波导均采用如

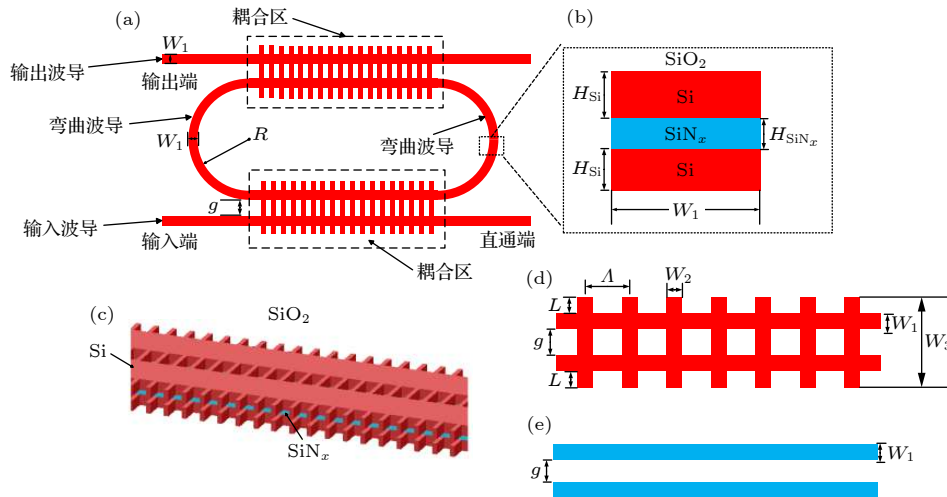


图 1 基于 SWG 和三明治结构的偏振无关微环谐振器结构示意图 (a) 俯视图; (b) 波导横截面示意图; (c) 基于 SWG 和三明治结构的耦合区三维结构示意图; (d) 耦合区 Si 层俯视图; (e) 耦合区 SiN_x 层俯视图

Fig. 1. Schematic configuration of the polarization insensitive ring resonator based on SWG and sandwiched structure: (a) Top view; (b) cross section of the waveguide; (c) three-dimensional schematic configuration of the polarization insensitive coupling region based on subwavelength grating slot waveguides and sandwiched structure; (d) top view of Si layer in coupling region; (e) top view of SiN_x layer in coupling region.

图 1(b) 所示的 Si/SiN_x/Si 三明治结构, Si 层厚度 $H_{\text{Si}} = 0.25 \mu\text{m}$, SiN_x 层厚度 $H_{\text{SiN}_x} = 0.1 \mu\text{m}$, 覆盖层为 SiO₂. 离子辅助沉积法 [17,18] 可调节 SiN_x 的折射率 $n(\text{SiN}_x)$ 在 1.72—3.43 范围内变化. 器件中弯曲波导处的 SiN_x 的折射率为 $n_2(\text{SiN}_x)$, 其余波导处 SiN_x 的折射率为 $n_1(\text{SiN}_x)$. 耦合区的三维结构如图 1(c) 所示, 该结构在图 1(b) 所示的三明治结构的基础上, 在 Si 层引入 SWG 结构, 如图 1(d) 所示, 它由两根宽度为 W_1 , 波导间隔为 g 的水平直波导和占空比为 W_3/Λ 、周期 $\Lambda = 0.2 \mu\text{m}$ 、宽度为 W_3 的 SWG 组成. 其中 $W_3 = g + 2W_1 + 2L$, $L = 0.2 \mu\text{m}$. SiN_x 层采用普通的定向耦合结构, 如图 1(e) 所示, 波导宽度为 W_1 , 波导间隔为 g .

3 器件功能实现与参数优化

3.1 微环谐振器偏振无关的实现

微环谐振器的偏振相关性主要由两个因素造成: 第一, 同一波长时微环耦合区的横电 (transverse electric, TE) 和横磁 (transverse magnetic, TM) 偏振模振幅耦合系数不同; 第二, 微环波导的双折射效应导致 TE 与 TM 偏振模对应的谐振波长不同. 因此, 需要同时满足耦合区偏振无关和谐振波长的偏振无关, 才能实现微环谐振器的偏振无关.

3.1.1 耦合区偏振无关的实现

由 (2) 式可知微环谐振器输出端的光强度与振幅耦合系数 k_1, k_2 有关. 因为上、下两个耦合区的结构完全相同, 所以有 $k_1 = k_2 = k$, 此时 (2) 式变为

$$|D|^2 = \left| \frac{k^2 \exp[-j(\phi + 2\varphi)]}{1 - (1 - k^2) \exp(-2j\varphi)} \right|^2. \quad (4)$$

由 (4) 式可知, 当微环波导的半径及器件其他波导长度、宽度不变 (即 ϕ 和 φ 不变) 的情况下, 输出端光强度仅与 k^2 有关. 因此要实现耦合区偏振无关需要满足下面公式:

$$k^2(\lambda, \text{TE}) = k^2(\lambda, \text{TM}), \quad (5)$$

式中, $k^2(\lambda, \text{TE})$ 和 $k^2(\lambda, \text{TM})$ 是波长为 λ , TE 和 TM 偏振模时耦合区的 k^2 .

然而, 事实上普通耦合区结构内 $k^2(\lambda, \text{TE})$ 远小于 $k^2(\lambda, \text{TM})$. 因此考虑采用三明治结构, 利用 Si 层和 SiN_x 层间的电场不连续性, 使得 TE 和 TM 偏振模分别在 Si 层和 SiN_x 层传播 [19], 如图 2 所

示. 此外, 在三明治结构的 Si 层中引入了 SWG 结构. SWG 结构如图 1(d) 所示: 当其周期小于布拉格周期时, 整个结构可当作均匀介质材料, 其等效折射率 n_B 为

$$n_B^2 \approx \frac{W_2}{\Lambda} n_{\text{GH}}^2 + \frac{\Lambda - W_2}{\Lambda} n_{\text{GL}}^2, \quad (6)$$

式中, n_{GH} 和 n_{GL} 分别为 SWG 中高和低折射率材料的折射率. 由 (6) 式可知: 通过改变 W_2 的值, 可提高 SWG 的等效折射率. 根据模式耦合原理可以推导出两根相邻直波导间的耦合系数:

$$K = \frac{\omega \epsilon_0}{4} \int_S (n_3^2 - n_1^2) \mathbf{E}_{1t} \cdot \mathbf{E}_{2t} dS. \quad (7)$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数; $\mathbf{E}_{1t}, \mathbf{E}_{2t}$ 分别为两根波导中电场的切向分量; n_1, n_3 分别为波导材料的折射率与两根波导间材料的折射率. 由于 TE 偏振模被局域在 Si 层中传播, 因此对于 $k^2(\lambda, \text{TE})$ 而言 n_1, n_3 分别为 Si 的折射率与 n_B . 由 (7) 式知: 通过提高 n_B , $k^2(\lambda, \text{TE})$ 的值也会随之增加, 最终实现 $k^2(\lambda, \text{TE}) = k^2(\lambda, \text{TM})$.

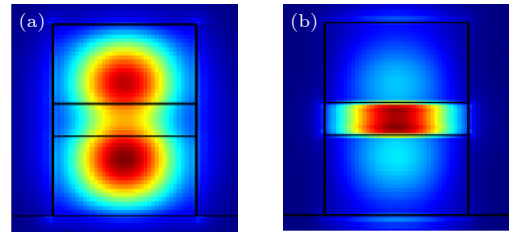


图 2 耦合区中的光场分布图 (a) TE 偏振模; (b) TM 偏振模

Fig. 2. Field distributions in the coupling region: (a) TE polarization mode; (b) TM polarization mode.

下面以 $g = 0.323 \mu\text{m}$, $n_1(\text{SiN}_x) = 1.9$ 为例, 讨论 W_2 对 $k^2(\lambda, \text{TE})$ 和 $k^2(\lambda, \text{TM})$ 的影响. 由图 3 可看出, 随着 W_2 的增加, $k^2(\lambda, \text{TE})$ 和 $k^2(\lambda, \text{TM})$ 均单调增加. 其中, 由于 TM 偏振模主要被限制在 SiN_x 层传播, 受到 W_2 变化的影响较小, 因此, $k^2(\lambda, \text{TM})$ 随着 W_2 的增加其增长幅度缓慢. 而 TE 偏振模主要被限制 Si 层的 SWG 结构中传输, 受到 W_2 变化的影响大, 因此 $k^2(\lambda, \text{TE})$ 随着 W_2 的增加而快速增加, 所以两者在图中存在交点 (图中虚线圈出位置). 在交叉点 ($W_2 = 0.06 \mu\text{m}$) 处 $k^2(\lambda, \text{TE}) = k^2(\lambda, \text{TM})$, 此时微环谐振器的耦合区实现偏振无关.

如上文所述, 当 g 和 $n_1(\text{SiN}_x)$ 确定时, 可以通过调节 W_2 得到 $k^2(\lambda, \text{TE}) = k^2(\lambda, \text{TM}) = k^2$, 使

得耦合区偏振无关. 为了便于后续器件性能优化时提供参数需要, 进一步探讨耦合区满足偏振无关时, k^2 受 g 和 $n_1(\text{SiN}_x)$ 的影响. 如图 4(a) 所示. k^2 随 $n_1(\text{SiN}_x)$ 的减小而增大, 当 $n_1(\text{SiN}_x)$ 固定时, k^2 随 g 的增大而减小. 图 4(b) 给出了图 4(a) 中每一组 g 和 $n_1(\text{SiN}_x)$ 实现耦合区偏振无关时所对应的 W_2 .

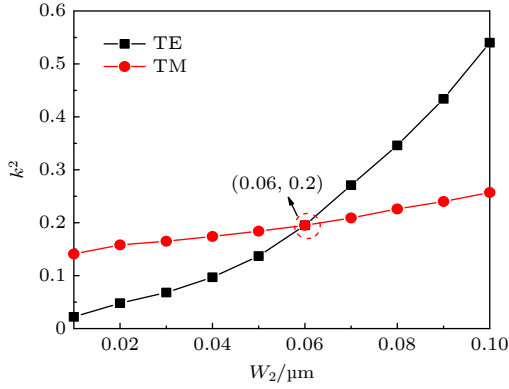


图 3 k^2 随 W_2 的变化

Fig. 3. k^2 as a function of W_2 .

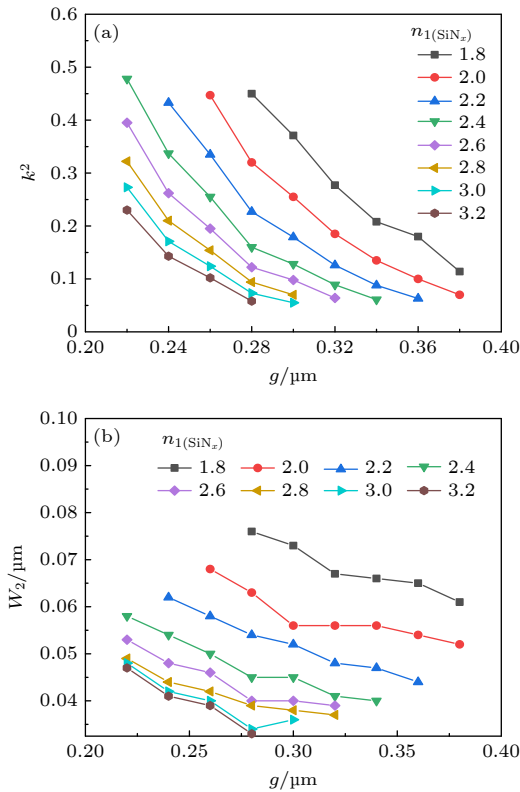


图 4 (a) 耦合区满足偏振无关时, 不同 $n_1(\text{SiN}_x)$ 情况下 k^2 随 g 的变化; (b) 每一组 g 和 $n_1(\text{SiN}_x)$ 实现耦合区偏振无关时其对应的 W_2

Fig. 4. (a) k^2 as a function of g under different $n_1(\text{SiN}_x)$ when the light intensity is polarization-insensitive; (b) W_2 as a function of g under different $n_1(\text{SiN}_x)$ when the light intensity is polarization-insensitive.

3.1.2 谐振波长偏振无关的实现

从 (1) 式可见: 微环谐振器的谐振波长和微环波导的模式有效折射率有关. 要实现谐振波长偏振无关, 就要求 TE 和 TM 偏振模的模式有效折射率相同, 从而使不同偏振模对应的谐振波长相等, 即满足下面公式:

$$\Delta\lambda = |\lambda(\text{TE}) - \lambda(\text{TM})| = 0. \quad (8)$$

事实上, 因为 SOI 波导本身具有双折射效应, TE 和 TM 偏振模的模式有效折射率并不相同. 并且有文献报道: 弯曲波导的引入会加剧器件的偏振相关性^[20]. 为了消除后者造成的影响, 目前主要采用增加弯曲波导半径的方式, 其缺点就是尺寸大, 不利于集成. 为了解决上述问题, 本文拟独立调整弯曲波导中三明治结构内 $n_2(\text{SiN}_x)$ 的大小, 使得 $\Delta\lambda = 0$. 如图 2 所示, 在三明治结构中 TE 偏振模与 TM 偏振模分别在 Si 层与 SiN_x 层传播, 因此当 $n_2(\text{SiN}_x)$ 变化时, $\lambda(\text{TM})$ 的改变量会明显大于 $\lambda(\text{TE})$ 的改变量, 从而有效地降低 $\Delta\lambda$. 图 5 为 $R = 10 \mu\text{m}$, $g = 0.323 \mu\text{m}$, $\Lambda = 0.2 \mu\text{m}$, $W_2 = 0.06 \mu\text{m}$, $n_1(\text{SiN}_x) = 1.9$ 时, $n_2(\text{SiN}_x)$ 变化对 $\Delta\lambda$ 的影响. 从图 5 可以看出, 随着 $n_2(\text{SiN}_x)$ 的增加, $\Delta\lambda$ 先单调减小再单调增加, 且在 $n_2(\text{SiN}_x) = 1.894$ 时 $\Delta\lambda = 0$. 此时 TE 和 TM 偏振模的谐振波长完全重合, 实现了谐振波长的偏振无关.

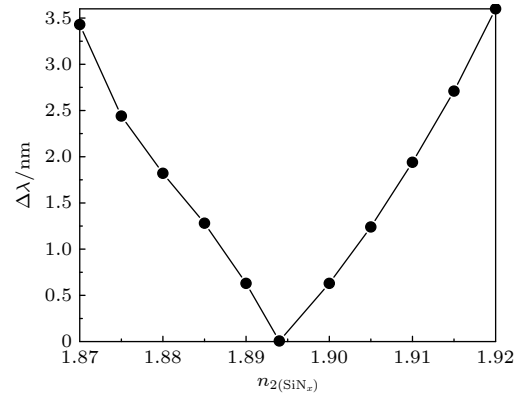


图 5 $\Delta\lambda$ 随 $n_2(\text{SiN}_x)$ 的变化

Fig. 5. $\Delta\lambda$ as a function of $n_2(\text{SiN}_x)$ in ring.

综上, 当微环谐振器参数取 $R = 10 \mu\text{m}$, $g = 0.323 \mu\text{m}$, $\Lambda = 0.2 \mu\text{m}$, $W_2 = 0.06 \mu\text{m}$, $n_1(\text{SiN}_x) = 1.9$, $n_2(\text{SiN}_x) = 1.894$ 时, 可以实现偏振无关的微环谐振器.

3.2 微环谐振器性能的优化

对于应用于密集波分复用器的微环谐振器而

言, 最重要的性能指标是插入损耗 (insertion loss, IL) 和 3-dB 带宽. IL 定义公式为

$$\text{IL (dB)} = -10 \log \left(\frac{P_d}{P_{\text{in}}} \right), \quad (9)$$

其中 P_d 为输出端的输出光功率峰值, P_{in} 为输入端的输入光功率.

3-dB 带宽指的是当输出功率下降到峰值的一半时的带宽, 在信道间隔为 0.8 nm 的密集波分复用器中一般要求 3-dB 带宽小于 0.8 nm^[11].

由 (4) 式可知, 在弯曲波导半径和器件其他波导长度、宽度不变的情况下, 输出端光强度仅与 k^2 有关. 而由定义可知: IL 和 3-dB 带宽均与输出端光强度有关, 因此 k^2 的变化会对 IL 与 3-dB 带宽产生直接的影响.

保持结构参数 $R = 10 \mu\text{m}$, $\Lambda = 0.2 \mu\text{m}$, $W_2 = 0.06 \mu\text{m}$, $n_1(\text{SiN}_x) = 1.9$, $n_2(\text{SiN}_x) = 1.894$ 不变, 仅通过改变 g 调整 k^2 的大小. 图 6 给出了 k^2 与 g 的变化关系, 由图可见, 随着 g 的增加, k^2 从 0.35 单调递减至 0.05.

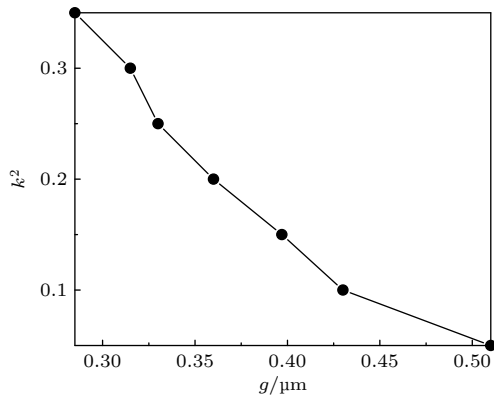


图 6 k^2 随 g 的变化

Fig. 6. k^2 of download port as a function of g .

图 7(a) 展示了 k^2 对 IL 的影响, 结果表明: IL 随着 k^2 的增加而减小, 并且在 $k^2 > 0.3$ 时, IL 接近 0. 为了得到较小的 IL, 希望 k^2 的取值尽量偏大. 图 7(b) 展示了 k^2 对 3-dB 带宽的影响. 结果表明: 在 k^2 从 0.05 增加至 0.35 的过程中, 3-dB 带宽也从 0.3 单调递增至 1.7. 考虑到 3-dB 带宽小于等于 0.8 nm 时, 可应用于信道间隔为 0.8 nm 的密集波分复用器. 因此, 此处可以选择 $k^2 \leq 0.2$, 结合图 7(a) 所示, 为了得到较小的 IL, 希望 k^2 的取值尽量偏大, 最终确定 $k^2 = 0.2$.

$k^2 = 0.2$ 时, 由前文涉及的图 4 可知: 存在多

种 $n_1(\text{SiN}_x)$, g 与 W_2 的组合, 能够令器件的耦合区满足偏振无关. 而不同的 $n_1(\text{SiN}_x)$, g 与 W_2 的组合, 会令器件 IL 发生改变. 为此, 进一步作参数优化. 图 8 展示了 IL 与 $n_1(\text{SiN}_x)$ 的关系: 随着 $n_1(\text{SiN}_x)$ 的增加 IL 先减小后增加, 在 $n_1(\text{SiN}_x) = 2.8$ 时 IL 达到最小值, 此时微环耦合区各参数分别为 $g = 0.24 \mu\text{m}$, $\Lambda = 0.2 \mu\text{m}$, $n_1(\text{SiN}_x) = 2.8$,

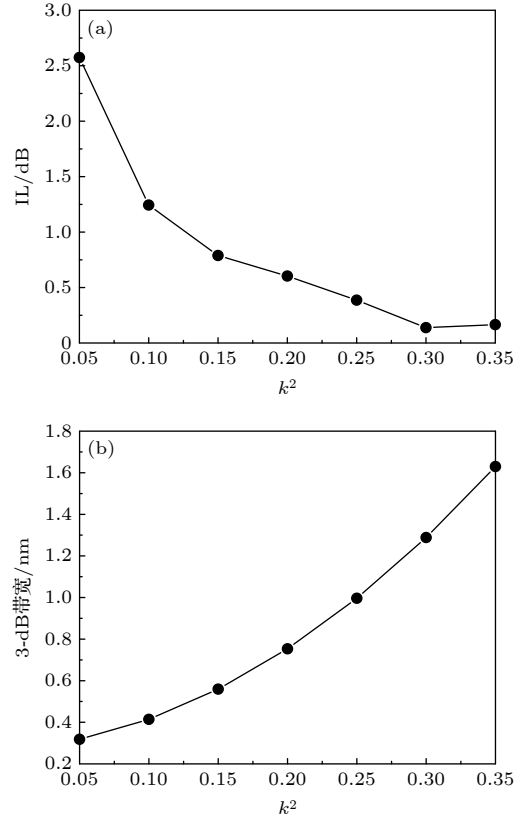


图 7 (a) k^2 变化对 IL 的影响; (b) k^2 变化对 3-dB 带宽的影响

Fig. 7. (a) IL of download port as a function of k^2 ; (b) 3-dB bandwidth as a function of k^2 .

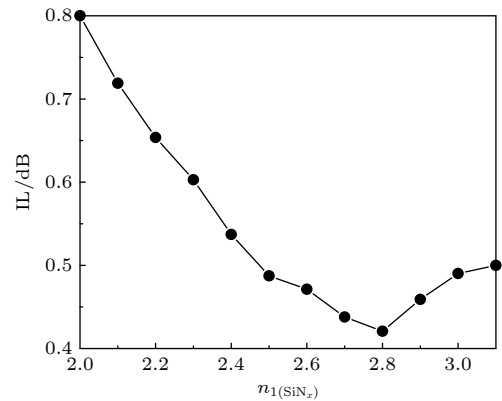


图 8 微环谐振器偏振无关且 $k^2 = 0.2$ 时 $n_1(\text{SiN}_x)$ 变化对 IL 的影响

Fig. 8. IL as a function of $n_1(\text{SiN}_x)$ when the ring resonator is polarization-insensitive and $k^2 = 0.2$.

$W_2 = 0.044 \mu\text{m}$. 因为耦合区参数发生变化, 所以需要重新调整 $n_2(\text{SiN}_x)$ 以实现谐振波长的偏振无关. 采用上文的方法进行调整, 当 $n_2(\text{SiN}_x) = 2.853$ 时有 $\Delta\lambda = 0$.

此时, TE 和 TM 偏振模时的输出端透过率谱线如图 9 所示: 在谐振波长 1552.26 nm 附近, 两者完全重合, 实现了偏振无关.

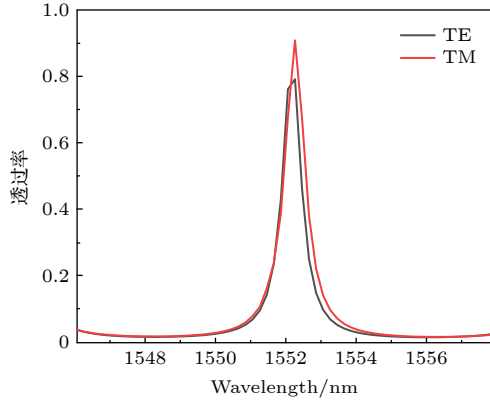


图 9 TE 和 TM 偏振模时的输出端透过率谱线

Fig. 9. Measured transmission spectra with TE- and TM-polarized light inputs for the out port.

综上所述, 所设计的微环谐振器结构参数为 $R = 10 \mu\text{m}$, $g = 0.24 \mu\text{m}$, $\Lambda = 0.2 \mu\text{m}$, $n_1(\text{SiN}_x) = 2.8$, $n_2(\text{SiN}_x) = 2.853$, $W_2 = 0.044 \mu\text{m}$, 器件在 TE 和 TM 偏振模时的 IL 分别为 0.77 与 0.42 dB; 3-dB 带宽分别为 0.68 与 0.7 nm, 符合通道间隔为 0.8 nm 的密集波分复用器的性能要求. 表 1 列出了已报道的偏振无关微环谐振器与所提出器件的性能的比较: 本文中器件的损耗远小于文献 [11–13] 中提及的, 并且尺寸仅为文献 [11,13] 中涉及的器件的 1/20. 综合考虑器件的损耗与尺寸, 本文设计的器件有着较大的优势.

表 1 偏振无关微环谐振器的性能参数

Table 1. Performances of the polarization-insensitive ring resonator.

性能参数	IL/dB	微环半径/ μm
文献[11]	<3	200
文献[12]	<3	3.7
文献[13]	<2	200
本文	<0.8	10

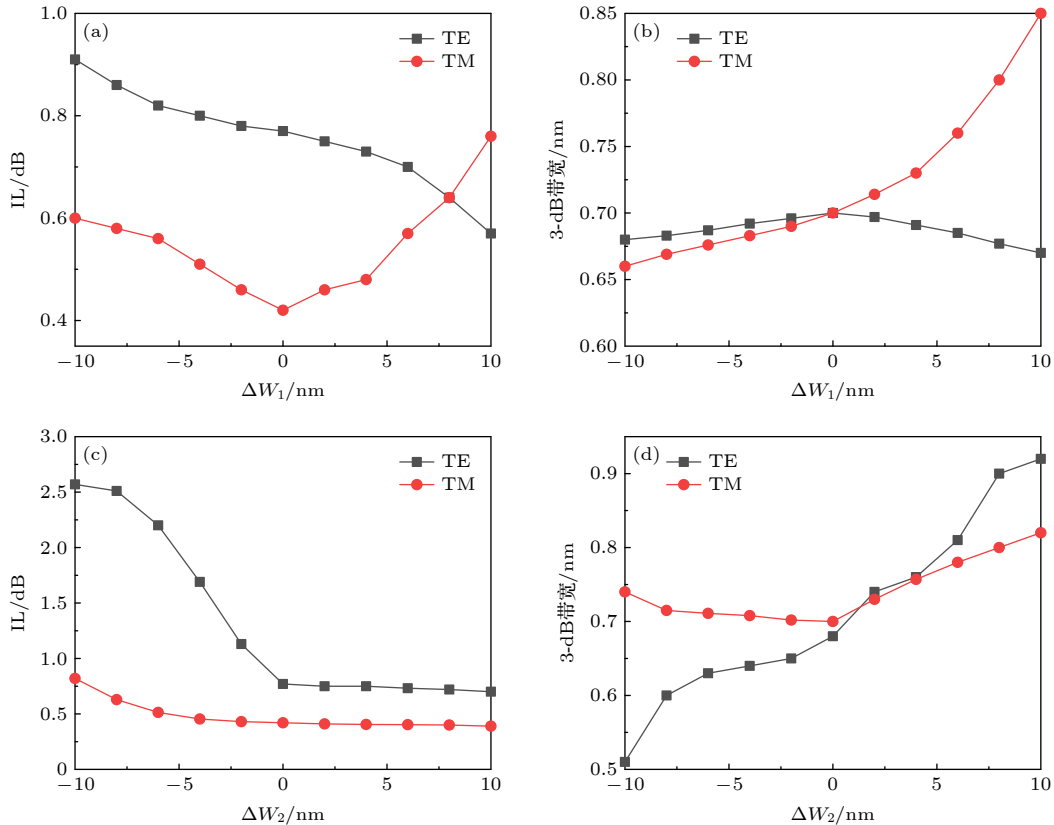


图 10 器件性能随结构参数的变化 (a) IL 随 ΔW_1 的变化; (b) 3-dB 带宽随 ΔW_1 的变化; (c) IL 随 ΔW_2 的变化; (d) 3-dB 带宽随 ΔW_2 的变化

Fig. 10. Performances as functions of structural parameters: (a) IL as a function of ΔW_1 ; (b) 3-dB bandwidth as a function of ΔW_1 ; (c) IL as a function of ΔW_2 ; (d) 3-dB bandwidth as a function of ΔW_2 .

此外, 需要考虑工艺制作偏差对器件光学性能的影响. 图 10(a)—(d) 讨论了器件参数 W_1 , W_2 的变化 ΔW_1 , ΔW_2 分别对器件 IL 和 3-dB 带宽的影响. 由图 10(a) 和图 10(b) 可看出, 器件对 W_1 的容差性较好, 当 ΔW_1 在 $-8 \sim 8$ nm 间变化时, IL < 1 dB, 3-dB 带宽小于 0.8 nm. W_2 主要影响微环谐振器的偏振相关性, 如图 10(c) 和图 10(d) 所示, 当 ΔW_2 在 $-5 \sim 5$ nm 间变化时, IL < 2 dB, 3-dB 带宽小于 0.8 nm, 此时器件性能仍然较为良好.

4 结 论

本文设计了一种基于 SWG 和三明治结构的偏振无关微环谐振器. 首先, 讨论如何利用组合结构实现微环谐振器耦合区的偏振无关, 分析了耦合区的结构参数对 $k^2(\lambda, \text{TE})$ 和 $k^2(\lambda, \text{TM})$ 的影响, 结果表明: 对于不同的 g 和 $n_1(\text{SiN}_x)$ 组合, 均可通过合理选择 W_2 使得 $k^2(\lambda, \text{TE}) = k^2(\lambda, \text{TM})$, 从而实现耦合区的偏振无关. 其次, 通过调整弯曲波导处 SiN_x 层的折射率 $n_2(\text{SiN}_x)$ 消除了微环谐振器谐振波长的偏振相关性. 最后, 经过参数优化, 使得所设计的微环谐振器在 TE 和 TM 偏振模时的 3-dB 带宽均小于 0.8 dB, 插入损耗均小于 0.8 dB. 并且, 所设计的微环半径仅为 10 μm 集成度更高, 插入损耗更低, 可用于信道间隔为 0.8 nm 的密集波分复用器. 最后对器件的制作容差进行了分析, 仿真结果表明在 $-8 \text{ nm} < \Delta W_1 < 8 \text{ nm}$, $-5 \text{ nm} < \Delta W_2 < 5 \text{ nm}$ 范围内, 器件性能较好 (IL < 2 dB, 3-dB 带宽小于 0.8 nm). 此外, 本文所设计的微环谐振器可采用感应耦合技术、反应离子刻蚀结合等离子体离子辅助沉积法等实现^[21,22].

参考文献

[1] Lee J M, Park S, Kim G 2008 *Opt. Commun.* **281** 4302

[2] Sang-Ngern S, Roeksabutr A 2006 *IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems* Singapore, December 4–7, 2006 p1907

[3] Heyn P D, Coster J D, Verheyem P, Lepage G, Pantouvakis M, Absil P, Bogaerts W, Campenhout J V, Thourhout D V 2013 *J. Lightwave Technol.* **31** 2785

[4] Chao I F, Lee C H, Chung Y H 2019 *4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)* Yichang, China, September 6–9, 2019 p30

[5] Kudo M, Ohta S, Taguchi E, Fujisawa T, Sakamoto T, Matsui T, Tsujikawa K, Nakajima K, Saitoh K 2019 *Opt. Commun.* **433** 168

[6] Balaji V R, Murugan M, Robinson S 2016 *International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)* Chennai, India, March 23–25, 2016 p33

[7] Libertino S, Coffa S, Saggio M 2000 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **3** 375

[8] Vlasov Y, McNab S 2004 *Opt. Express* **12** 1622

[9] Xu Q F, Fattal D, Beausoleil R G 2008 *Opt. Express* **16** 4309

[10] Barwicz T, Watts M R, Popovi M A, Rakich P T, Socci L, Krtner F X, Ippen E P, Smith H I 2007 *Nat. Photonics* **1** 57

[11] Xu D X, Janz S, Cheben P 2006 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **18** 343

[12] Geng M M 2016 *Laser Optoelectron. Prog.* **53** 182

[13] Wang X D, Li Y Q, Quan X L, Cheng X L 2019 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)* Munich, Germany, June 23–27, 2019 JTh2 A.64

[14] Chen Y, Joines W T 2003 *Opt. Commun.* **228** 319

[15] Kaalund C J 2004 *Opt. Commun.* **237** 357

[16] Little B E, Chu S T, Haus H A, Foresi J, Laine J P 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 998

[17] Lee C C, Chen H L, Hsu J C, Tien C L 1999 *Appl. Opt.* **38** 2078

[18] 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]

[19] Wang J L, Chen Z Y, Chen H M 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 054206 (in Chinese) [汪静丽, 陈子玉, 陈鹤鸣 2020 物理学报 **69** 054206]

[20] Shi Y J, Shang H P, Sun D G 2018 *Opt. Commun.* **410** 211

[21] Zhang F L, Zhai S, Pan J, Feng J J 2020 *Chin. J. Lasers* **43** 1 (in Chinese) [张福领, 翟珊, 潘俊, 冯吉军 2020 中国激光 **43** 1]

[22] Liu X H, Xue B, Zheng Z H, Zhou Z Y, Zhou S Z 1989 *J. Semicond.* **1989** 457 (in Chinese) [柳襄怀, 薛滨, 郑志宏, 周祖尧, 邹世昌 1989 半导体学报 **1989** 457]

Design and simulation of polarization-insensitive ring resonator based on subwavelength grating and sandwiched structure^{*}

Wang Jing-Li^{1)†} Zhang Jian-Zhe¹⁾ Chen He-Ming²⁾

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 21 November 2020; revised manuscript received 12 January 2021)

Abstract

Ring resonator fabricated on a silicon-on-insulator is versatile in optical integration, which can be used to realize filters, modulators and switches. However, silicon-on-insulator is difficult to control the polarization dependence, and thus its application is greatly limited. The polarization dependence of the ring resonator is caused mainly by two factors: the coupling coefficients of the coupling region at the same wavelength for the two orthogonal polarization modes are different, and the birefringence effect of curved waveguide results in the different resonant wavelengths of TE and TM polarization modes. When the coupling region polarization independence and the resonant wavelength polarization independence are simultaneously satisfied, the polarization independence of the ring resonator can be realized. In this paper, a new type of polarization-insensitive ring resonator on a silicon-on-insulator is designed based on subwavelength grating and sandwiched structure. Firstly, by adjusting the duty cycle of the subwavelength grating and the refractive index of SiN_x in the coupling region, polarization independence of the coupling region is achieved. Secondly, the refractive index of SiN_x in curved waveguides is designed to make the resonance wavelengths for orthogonal polarization modes equal. Thirdly, the parameters of the coupling region are optimized to reduce the insertion loss. The three-dimensional finite-difference time-domain method is used for simulation. The results show that the radius of the ring is only 10 μm , the 3-dB bandwidth of the device is less than 0.8 nm, and the insertion loss is lower than 0.8 dB. It has potential applications in the future dense wavelength division multiplexing systems.

Keywords: microring resonators, polarization-insensitive, subwavelength grating, sandwiched structure

PACS: 42.79.-e, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.70.20201965

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61571237), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20151509), and the NUPTSF of China (Grant No. NY217047).

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