

基于 Bragg 光栅的超高消光比 SOI 波导偏振器设计

毛玉政¹, 陈亚婧¹, 朱京平²

- (1. 航空工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065;
2. 西安交通大学 电子科学与工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 波导偏振器是片上集成相干光学系统中的关键器件之一, 超高消光比、低损耗、紧凑型波导偏振器的设计一直是研究的热点。基于绝缘体上硅平台的倾斜 Bragg 光栅被用于实现超高消光比波导偏振器结构。利用一维光子晶体能带理论分别计算 TE 和 TM 模式光的能带结构分布, 选择 TE 模式禁带与 TM 导带重叠带隙设计光栅, 可实现 TM 模式低损传输, 而 TE 模式被 Bragg 光栅高效反射, 从而产生超高偏振消光比。3D FDTD 仿真表明: 16 μm 倾斜 Bragg 光栅波导偏振器可在中心波长 1 550 nm 附近 70 nm 的带宽内, 实现大于 37 dB 的超高消光比, 器件的损耗小于 0.64 dB; 进一步增加光栅周期数, 当长度为 25 μm 时, 消光比可提高至 46 dB。Bragg 光栅倾斜角与刻蚀宽度偏差仿真表明: 设计的结构加工误差容限较大, 同时该结构仅需一次曝光刻蚀, 工艺流程简单。

关键词: 偏振器; Bragg 光栅; 一维光子晶体; SOI 波导

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210713

Design of Bragg grating-based ultra-high extinction ratio polarizer on silicon-on-insulator waveguide

Mao Yuzheng¹, Chen Yajing¹, Zhu Jingping²

- (1. Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710065, China;
2. School of Electronic Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The waveguide polarizer is a key component of an on-chip integrated coherent optical system, and it has attracted much interest to design a waveguide polarizer with an ultrahigh extinction ratio, low excess loss and compact size in photonic integrated circuits. A tilted Bragg grating-based polarizer on a silicon-on-insulator platform was proposed and designed by one-dimensional photonic crystal band gap theory. The energy band structure distribution for the TE and the TM modes were calculated using the energy band theory of one-dimensional photonic crystals, and the overlap gap between the forbidden band of the TE mode and the transmission band of the TM mode were used to determine the grating structure parameters. As a result, the TM mode light could pass through the Bragg grating waveguide with a low excess loss, while the TE mode shows almost complete reflection, introducing an extremely high polarization extinction ratio. The 3D FDTD simulation results suggest that a 16 μm tilted Bragg grating-based waveguide polarizer could achieve an ultrahigh extinction ratio of more than 37 dB at the central wavelength of 1 550 nm over a broad bandwidth of 70 nm, and the excess loss of the device is less than 0.64 dB. With an increasing length of waveguide to 25 μm , the extinction ratio could further reach up to 46 dB. The effects of the tilt angle and etching deviation on the performance of the polarizer were also studied, and the results show that the designed structure has a good fabrication tolerance. In addition,

收稿日期: 2021-09-26; 修订日期: 2021-12-28

作者简介: 毛玉政, 男, 工程师, 博士, 主要从事集成光学设计、光子芯片光纤陀螺相关领域的研究。

the polarizer only needs one-step etching with a simple fabrication process.

Key words: polarizer; Bragg grating; one-dimensional photonic crystal; SOI waveguide

0 引言

绝缘体上硅 (Silicon on Insulator, SOI) 材料平台因其与成熟的 CMOS 工艺兼容, 可实现低成本、大规模量产的优势, 广泛地应用于光子集成芯片设计之中。SOI 波导结构的芯层 Si 与包层 SiO₂ 折射率相差很大, 因此可在极小的弯曲半径时实现低损耗传输^[1], 这对进一步减小芯片尺寸, 提高集成度十分有利。然而由于较大折射差率, SOI 波导通常会引入较大的偏振模式色散^[2]、偏振相关损耗及波长漂移^[3]。在许多光传感、相干光系统中, 如集成光学陀螺^[4]、偏振相干探测系统^[5]等, 为了抑制偏振模式串扰/误差, 仅允许某一特定偏振态的光传输, 因此, 片上偏振控制器件必不可少。波导偏振器可通过滤除一种偏振态, 而保留其正交偏振模式, 以简单的方式实现在光子回路中偏振透明传输。近年来, 基于 Bragg 光栅结构的波导偏振器结构因其具有高偏振消光比、低损耗及大带宽等优势, 成为研究的热点。2014 年, 戴道锌课题组^[6]利用亚波长光栅在 SOI 波导上实现了 27 dB 的偏振消光比, 损耗低至 0.5 dB, 但带宽较小; 周治平课题组^[7]提出了一种基于混合等离子 Bragg 光栅的偏振器结构, 可有效缩短波导长度, 2.5 μm 即可实现 25 dB 的高消光比, 但制作工艺极为复杂; 2020 年, Kazanskiy 等^[8]利用周期光栅结构实现了整个 C 波段大于 28.5 dB 的消光比, 器件损耗约 2 dB。传统的光栅偏振器为垂直光栅结构, 反射光发生回耦, 会引起较强的端面反射; 且光栅参数通常需要多次仿真计算才能得到最优参数^[9-10], 设计过程相对复杂。

针对这些不足, 文中提出了一种基于倾斜 Bragg 光栅的 SOI 波导偏振器结构, 并利用一维光子晶体能带理论计算 TM 导带与 TE 禁带的重叠带隙, 用于光栅设计, 可快速得到最优参数, 使得 TE 模式光经过光栅被高效反射, 而 TM 模式以极低的损耗传输通过, 实现超高偏振消光比与低损耗。此外文中还研究了 Bragg 光栅周期层数、光栅倾斜角及刻蚀宽度偏差等参数对偏振器的损耗、消光比及工作带宽等关键指标的影响, 并进行了分析讨论。

1 偏振器结构

SOI 波导基本结构一般为 Si 衬底上生长一定厚度的 SiO₂ 绝缘缓冲层, 中间为波导芯层 Si ($n_{\text{core}}=3.47$), 上包层为 SiO₂ ($n_{\text{cladding}}=1.444$), 产生超高折射率差。设计的超高消光比偏振器结构如图 1 所示, 主要由 SOI 输入波导、倾斜 Bragg 光栅波导及输出波导三部分构成。倾斜 Bragg 光栅由 Si 与 SiO₂ 两种不同材料介质层周期排列构成。该结构仅需一次曝光刻蚀, 制作工艺十分简单。

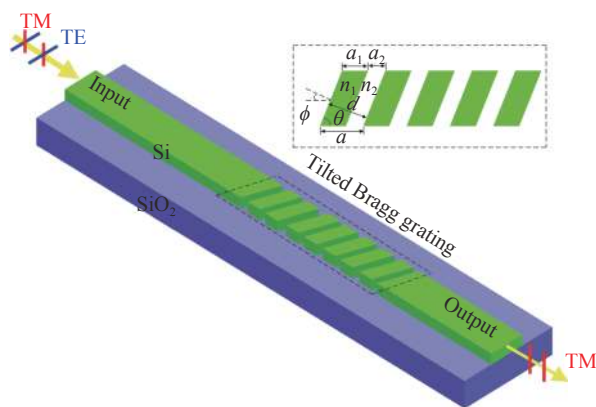


图 1 倾斜 Bragg 光栅 SOI 波导偏振器原理结构

Fig.1 Schematic layout of titled Bragg grating-based polarizer on SOI waveguide

其中 Bragg 光栅周期为 a , 两种介质层的宽度分别为 a_1 与 a_2 , 对应有有效折射率分别为 n_1 与 n_2 。 θ 为 Bragg 光栅与光传输方向的倾斜夹角, ϕ 为关于光栅界面法线方向的入射角, d 为相应的周期间距。满足以下几何关系:

$$\begin{aligned} \theta + \phi &= 90^\circ \\ a_1 + a_2 &= a, \quad a \cdot \sin \theta = d \end{aligned} \quad (1)$$

满足 Bragg 相位条件的光经过光栅发生高效反射, 而其他部分光会透射传输, 利用此原理可实现 TE 与 TM 模式的分离。

2 设计原理

Bragg 光栅由宽度分别为 d_1 与 d_2 的两种介质层交替组成, 结构如图 2 所示。利用一维光子晶体能带

理论可计算相应 Bragg 光栅的带隙分布, 准确地进行光栅参数设计。

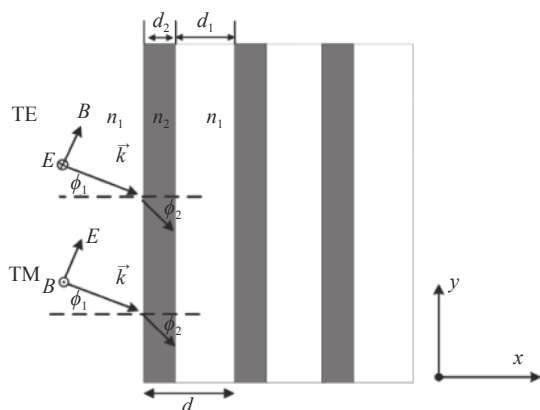


图 2 光在一维光子晶体结构中的传输特性

Fig.2 Properties of light propagated in one-dimensional photonic crystal structure

光在两种介质层中的场 E_1 、 H_1 与 E_2 、 H_2 关系可由传输矩阵^[11]表示:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

经过一个周期, 传输矩阵为:

$$M_d = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = M_1 \cdot M_2 = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & -\frac{i}{p_1} \sin \delta_1 \\ -ip_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \delta_2 & -\frac{i}{p_2} \sin \delta_2 \\ -ip_2 \sin \delta_2 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_i d_i \cos \phi_i$ ($i = 1, 2$); p 取值与偏振模式相关, 对于 TE 模式: $p_i = \sqrt{\epsilon_i / \mu_i} \cos \phi_i$; 而对于 TM 模式: $p_i = \sqrt{\mu_i / \epsilon_i} \cos \phi_i$ 。

根据 Bloch-Fouquet 理论, Bloch 波矢 K 满足关系:

$$K = \frac{i}{d} \ln \left\{ \frac{1}{2} (m_{11} + m_{22}) \pm \sqrt{\left[\frac{1}{2} (m_{11} + m_{22}) \right]^2 - 1} \right\} \quad (4)$$

利用 Bloch 波矢 K 的取值, 可判断光在一维光子晶体结构中的传输状态。若 K 为实数, 即 $|m_{11} + m_{22}|/2 < 1$, 对应光子晶体导带; 若 K 为虚数, 相应满足 $|m_{11} + m_{22}|/2 > 1$, 则光处于消逝态 (光子晶体禁带), 从而得到一维光子晶体的能带分布^[12]。

对角频率 ω 关于 $2\pi c/d$ ($2\pi/d$ 为一维光子晶体的倒易空间点阵基矢) 进行归一化, 得到归一化频率 ϖ 表

达式为:

$$\varpi = \frac{\omega}{2\pi c/d} = \frac{\omega d}{2\pi c} = \frac{d}{\lambda} \quad (5)$$

式中: c 为真空中光速; λ 为真空中波长。取介质层宽度比例 $h = d_1/d$, 则 $d_2 = d(1-h)$ 。波矢的平行分量 k_y 由基矢 $2\pi/d$ 表示为 $k_y = k' \cdot (2\pi/d)$ 。给定 h , 结合公式 (3) 与 (4), 根据 Bloch 波矢 K 的取值, 可以计算得到两种偏振模式下一维光子晶体在 $\omega - k_y$ 平面上的能带分布, 如图 3 所示 (灰色区域为导带, 白色区域为禁带)。

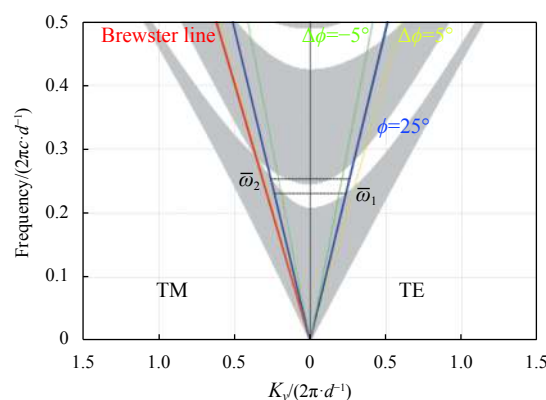


图 3 一维光子晶体能带结构分布

Fig.3 Band structure distribution of one-dimensional photonic crystal

当 $k_y = 0$ 时, $\phi = 0$, 对应垂直入射。图中横坐标数值 $k' = k_y \cdot (d/2\pi)$, 纵坐标的数值 $\varpi = \omega \cdot (d/2\pi c)$, 则 ϖ , k' 之间的关系为:

$$\varpi = \frac{k}{\sqrt{\mu \epsilon_1}} \cdot \frac{d}{2\pi c} = \frac{k_y c}{n_1 \sin \phi} \cdot \frac{d}{2\pi c} = \frac{1}{n_1 \sin \phi} k' \quad (6)$$

则 $\varpi - k'$ 直线的斜率即为 $1/n_1 \sin \phi$, 由此可得到不同入射角 ϕ 下光子带隙的分布。选择 ϕ 角入射时, TE 模式禁带的下边界 (ϖ_1) 与 TM 模式导带的上边界 (ϖ_2), 即可得到重叠带隙。根据公式 (5), d 为常数, 归一化角频率 $\varpi_1 \sim \varpi_2$ 对应的波长范围为:

$$\lambda_1 = d/\varpi_1, \quad \lambda_2 = d/\varpi_2 \quad (7)$$

取偏振器工作的中心波长 $\lambda_0 = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$, 从而 Bragg 光栅周期可由以下公式确定:

$$d = \frac{2\lambda_0 \varpi_1 \varpi_2}{\varpi_1 + \varpi_2} \quad (8)$$

再根据公式 (1), 即可确定倾斜光栅周期 a 、倾斜角 θ 等结构参数, 从而实现倾斜 Bragg 光栅型波导偏

振器的设计。

上述方法利用能带理论来设计光栅参数,也可对光在波导中的传输特性进行分析。为实现 TE 模式高效反射, TM 低损传输,应满足如下 Bragg 条件:

$$L_B^{\text{TE}} = n_1^{\text{TE}} d_1 \cos \phi + n_2^{\text{TE}} d_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1^{\text{TE}}}{n_2^{\text{TE}}} \right)^2 \sin^2 \phi} = \frac{\lambda_0}{2}$$

$$L_B^{\text{TM}} = n_1^{\text{TM}} d_1 \cos \phi + n_2^{\text{TM}} d_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1^{\text{TM}}}{n_2^{\text{TM}}} \right)^2 \sin^2 \phi} < \frac{\lambda_0}{2} \quad (9)$$

式中: n_1^{TE} 、 n_1^{TM} 、 n_2^{TE} 、 n_2^{TM} 分别为 TE 与 TM 模式在相应介质层的有效折射率,可通过数值仿真计算得到。利用上式可以验证能带理论设计参数的可靠性。

3 仿真分析

设计 SOI 波导的尺寸为 $500 \text{ nm} \times 220 \text{ nm}$, 偏振器工作的中心波长 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$, $h = 0.75$, 利用一维光子晶体能带理论计算得到 Bragg 光栅的 TE 与 TM 模式带隙分布 (见图 3)。选择入射角 $\phi = 25^\circ$, 作 $\omega = 1/n_1 \sin 25^\circ \cdot k'$ 直线与能带结构相交, 由此可得到 TE 模式禁带与 TM 模式导带的重叠带隙上下边界分别为: $\omega_1 = 0.2302$, $\omega_2 = 0.2508$, 根据公式 (8) 可得到 Bragg 光栅周期 $d = 372.1 \text{ nm}$ 。从而 $\theta = 65^\circ$, $a = 410.6 \text{ nm}$ 。

根据上述参数构建模型, 利用 MODE Solutions (FDE) 软件可分别计算 TE 与 TM 模式光在波导结构中传输的有效折射率, $n_1^{\text{TE}} = 2.442$, $n_1^{\text{TM}} = 1.766$, 根据公式 (9) 计算有: TM 模式 $L_B^{\text{TM}} = 561.7 < \lambda_0/2 = 775$, 对于 TE 模式 $L_B^{\text{TE}} = 777.6$, 基本满足 Bragg 条件, 验证了计算参数的准确性。

3.1 不同周期数 Bragg 光栅波导偏振器

周期层数对光传输效率有很大的影响, 改变周期层数 N , 从 10 层依次增加至 60 层 (间隔为 10 层), 利用 FDTD Solutions 软件进行 3D 建模仿真, 仿真波长扫描范围从 $1500 \sim 1600 \text{ nm}$ (间隔 5 nm)。TE 与 TM 模式经过倾斜 Bragg 光栅波导传输透射效率分别为 T_{TE} , T_{TM} , 则 TM 光栅偏振器的消光比为 TE 模式与 TM 模式的传输损耗之差, $ER = 10 \log_{10} (T_{\text{TM}}/T_{\text{TE}})$, 偏振器附加损耗为 TM 模式的传输损耗 $IL = -10 \log_{10} T_{\text{TM}}$ 。仿真得到了 TE 模式与 TM 模式光经过不同周期层数倾斜 Bragg 光栅波导的损耗, 并计算偏振器的消光比, 如图 4 所示。

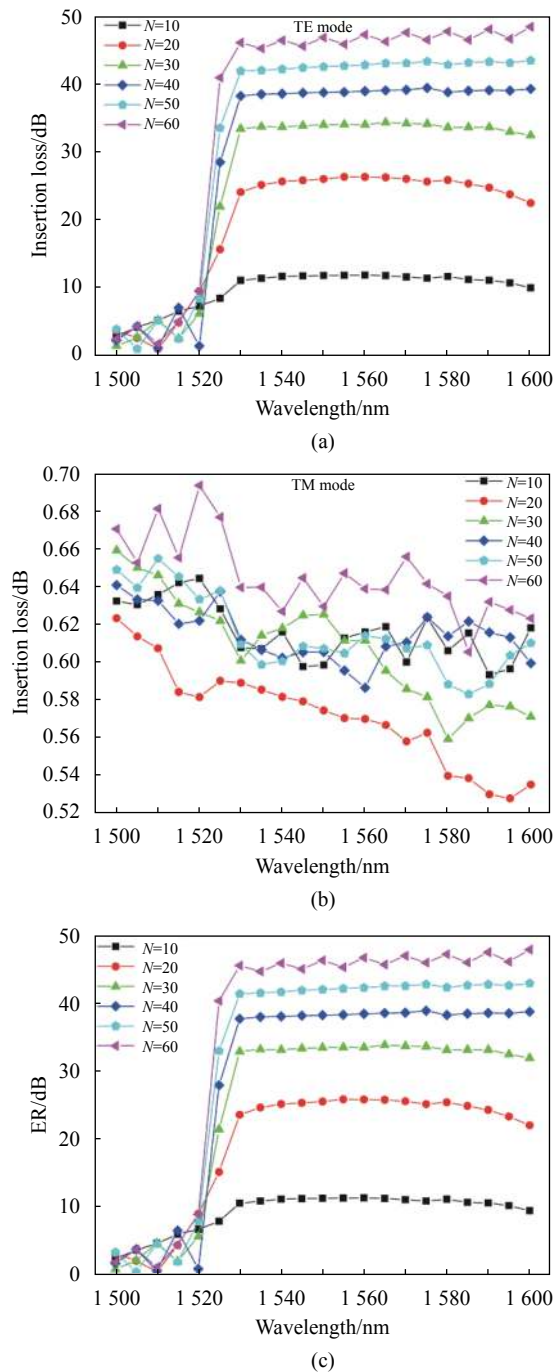


图 4 不同周期层数 Bragg 光栅波导偏振器传输。(a) TE 模式损耗; (b) TM 模式损耗; (c) 偏振器消光比

Fig.4 Transmission properties of waveguide polarizers with different Bragg grating periods. (a) TE mode loss; (b) TM mode loss; (c) Extinction ratio of polarizer

$N=10$ 时, 中心波长 1550 nm 处 TE 传输损耗 $> 11.8 \text{ dB}$; 随着光栅周期层数增加, TE 模式的损耗迅速增加, 当 N 增加至 60 层时, 传输损耗 $> 46.8 \text{ dB}$, 此时光几乎被完全反射。而对于 TM 模式光, 绝大部分光透射

传输,随着周期层数的增加,传输损耗增量<0.12 dB。

从仿真结果可知,当周期层数由 30 增加至 40 层时,中心波长处消光比由 33 dB 进一步提高至 38 dB (满足大部分应用需求),而器件损耗几乎不发生变化。考虑波导尺寸,选择 $N=40$ 设计光栅,此时 Bragg 光栅波导的长度约 $16\ \mu\text{m}$,可实现 C 波段及 L 波段 70 nm 的带宽内>37.6 dB 的超高消光比,损耗小于 0.64 dB。仿真得到了 TE 与 TM 模式光在经过 Bragg 光栅偏振器传输的模式场分布变化,如图 5 所示,可以直观发现 TE 模式光经过 Bragg 光栅后迅速衰减,而 TM 模式几乎没有变化。图 6 中 TE 与 TM 模式沿光传输方向的场分布也能说明 TE 模式接近完全反射, TM 模式低损传输,从而产生高消光比。

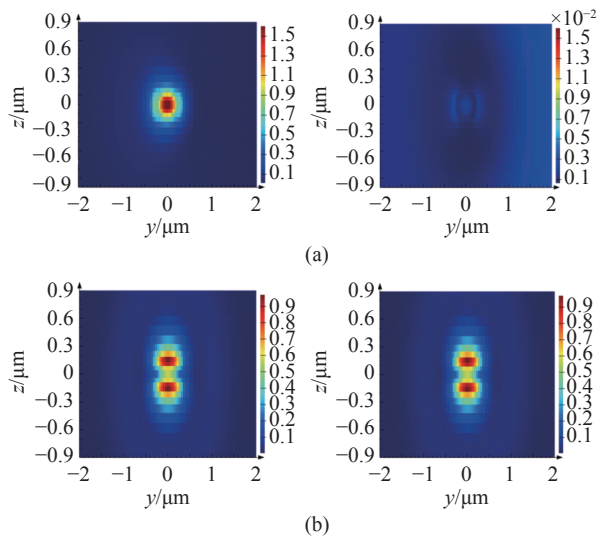


图 5 中心波长处 (a) TE 与 (b) TM 模式光经过 Bragg 光栅偏振器传输的模式场分布变化

Fig.5 Variations of mode field distributions of light for (a) TE and (b) TM mode at center wavelength propagated in Bragg grating polarizer

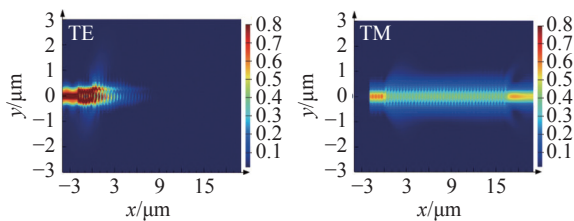


图 6 TE 与 TM 模式沿光传输方向的场分布

Fig.6 Field distributions of light along propagated direction for TE and TM mode

3.2 光栅倾角偏差对偏振器性能影响

仿真得到了不同倾角偏差下光栅偏振器的 TE 与 TM 模式传输损耗,并计算消光比,如图 7 所示。

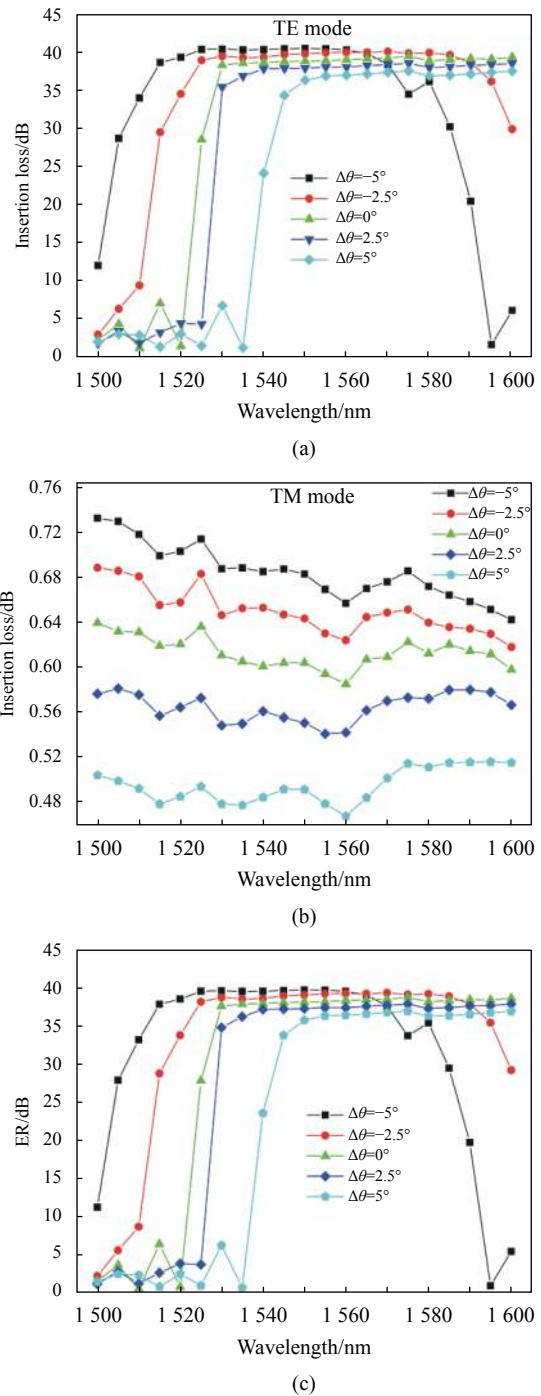


图 7 不同 Bragg 光栅倾斜角偏差的偏振器传输。(a) TE 模式损耗; (b) TM 模式损耗; (c) 消光比

Fig.7 Transmission properties of Bragg grating-based polarizers with different tilted angle deviations. (a) TE mode loss; (b) TM mode loss; (c) Extinction ratio

当 $\Delta\theta$ 从 -5° 变化至 5° 时, TE 模式的高反射带 (传输损耗大) 往长波方向移动; TM 模式传输损耗逐渐降低。 $\Delta\theta=-5^\circ$ 时, 偏振器可实现 1510~1585 nm 波段大于 30 dB 的消光比; 当 $\Delta\theta=5^\circ$ 时, 偏振器在 1545~1600 nm 波段消光比大于 30 dB, 有效工作带宽变窄。这种变化趋势可根据光子晶体能带结构 (见图 3) 解释说明, $\Delta\theta$ 从 -5° 变化至 5° , 对应 $\Delta\phi$ 从 5° 变化至 -5° , 此时 TE 模式禁带边界 ω 的值变小, 且禁带宽度变窄。当周期 d 不变时, 根据关系 $\omega = d/\lambda$, 禁带边界波长增大, 带宽减小。而当 $\Delta\theta$ 从 0 变化至 2.5° 时, 高消光比有效带宽几乎不变, 器件损耗由 0.61 dB 减小至 0.55 dB, 故可取 $\Delta\theta=2.5^\circ$ 以得到最优性能。

综上所述, 光栅倾角的变化会对偏振器的工作波段及带宽产生影响, 但在一定偏差范围内仍能保证偏振器在中心波长附近的性能。

3.3 刻蚀宽度偏差对偏振器性能影响

刻蚀层宽度 a_2 的偏差也会对偏振器性能产生重要影响, 仿真中分别取 $h=0.70$ 、0.72、0.75、0.78、0.80, 得到不同宽度下 TE 与 TM 模式传输损耗及消光比, 如图 8 所示。

当 h 从 0.7 增加至 0.8 时, 刻蚀宽度 a_2 逐渐变小, TE 模式的高反射 (传输损耗大) 带往长波方向移动, 对偏振器工作波段影响明显。在 h 取值较小时, 偏振器能够在宽波段范围内保持高消光比, 而 TM 模式的传输损耗略有增加; 当 h 不断增大至 0.80 时, 在中心波长 1550 nm 处, 消光比 < 4 dB, 性能已不满足设计需求。但当 $h=0.72$ 与 0.78, 对应刻蚀宽度偏差 $\Delta a_2 = \pm 12$ nm, 此时偏振器仍能保持在中心波长附近较大的带宽内的高消光比, 且附加损耗波动较小, 表明设计的器件具有较好的误差容限。

将上述仿真结果与国内外相关研究报道^[13-14]对比表明: 在波导长度相近的前提下, 设计的倾斜 Bragg 光栅波导偏振器在性能方面具有更大优势, 能够实现高消光比、低损耗及大带宽。且该结构基于常用的 220 nm 芯层的 SOI 平台设计, 工艺简单成熟, 设计的结构具有较好的刻蚀误差容限, 故器件加工难度低。后续工作可推进非均匀周期准啁啾光栅设计^[15], 以进一步增大工作带宽, 并实现该偏振器结构在更多相关领域应用^[16]。

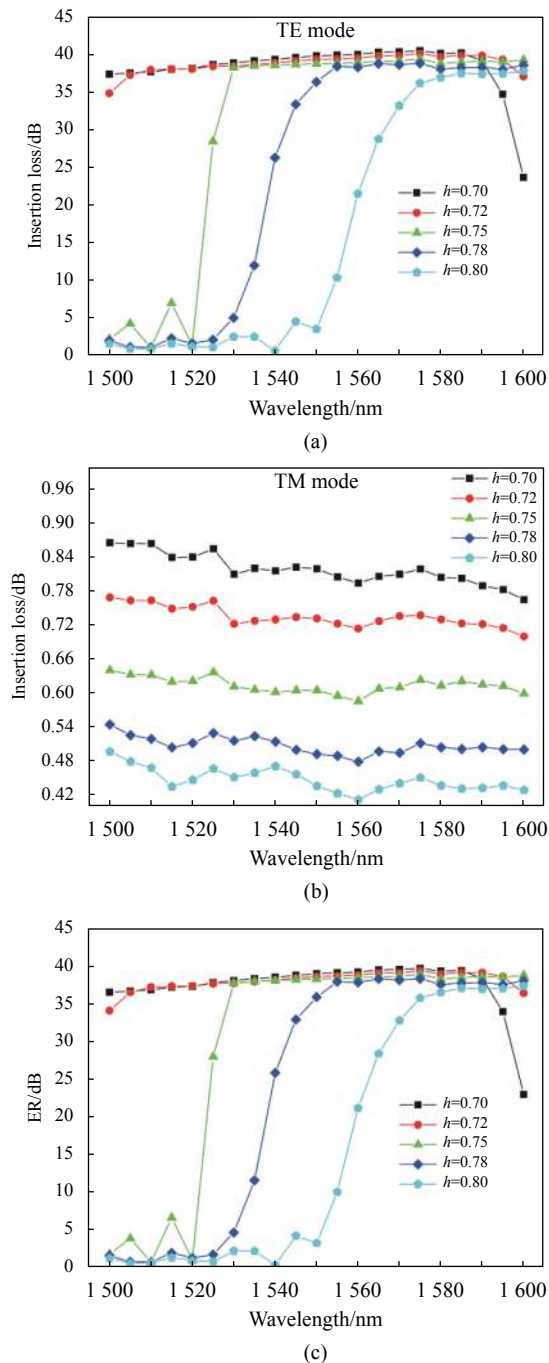


图 8 不同介质层宽度比例 Bragg 光栅偏振器传输。(a) TE 模式损耗; (b) TM 模式损耗; (c) 消光比

Fig.8 Transmission properties of Bragg grating-based polarizers with different width ratios. (a) TE mode loss; (b) TM mode loss; (c) Extinction ratio

4 结 论

文中提出了一种基于倾斜 Bragg 光栅的紧凑型 SOI 波导偏振器结构, 并利用一维光子晶体能带理论

分别计算 Bragg 光栅的 TE 模式与 TM 模式带隙分布差异, 确定结构参数, 保证 TM 模式光在 Bragg 光栅中低损透射传输, 而 TE 模式被高效反射, 实现在 70 nm 大工作带宽内保持 >37 dB 超高偏振消光比。相比传统 Bragg 光栅结构及设计方法, 该偏振器能够减小端面反射, 参数设计更加灵活准确。同时加工工艺简单, 刻蚀误差分析表明其具有较好的加工误差容忍。该结构在相干光探测、光传感等对片上偏振串扰抑制要求极高的领域, 具有很大的应用潜力。

参考文献:

- [1] Yuan P, Wang Y, Wu Y D, et al. Monolithic integration of a wavelength division multiplexer/demultiplexer and electro-absorption VOAs based on 3 μm -SOI [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 0818004. (in Chinese)
- [2] Ni B, Xiao J. Plasmonic-assisted TE-pass polarizer for silicon-based slot waveguides [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(5): 463-466.
- [3] Wu S, Mao S, Zhou L, et al. A compact and polarization-insensitive silicon waveguide crossing based on subwavelength grating MMI couplers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 27268-27276.
- [4] Khial P P, White A D, Hajimiri A. Nanophotonic optical gyroscope with reciprocal sensitivity enhancement [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(11): 671-675.
- [5] Saber M G, Vallillosera G, Patel D, et al. Silicon-based optical links using novel direct detection, coherent detection and dual polarization methods for new generation transport architectures [J]. *Optics Communications*, 2019, 450: 48-60.
- [6] Guan X, Chen P, Chen S, et al. Low-loss ultracompact transverse-magnetic-pass polarizer with a silicon subwavelength grating waveguide [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4514-4517.
- [7] Bai B, Liu L, Chen R, et al. Low loss, compact TM-pass polarizer based on hybrid plasmonic grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(7): 607-610.
- [8] Kazanskiy N L, Butt M A. One-dimensional photonic crystal waveguide based on SOI platform for transverse magnetic polarization-maintaining devices [J]. *Photonics Letters of Poland*, 2020, 12(3): 85-87.
- [9] Ji J T, Zhai Y S, Wu Z P, et al. Detection of surface plasmons based on periodic grating structure [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(8): 526-534. (in Chinese)
- [10] Xu Z, Lyu T, Sun X. Interleaved subwavelength gratings strip waveguide based TM pass polarizer on SOI platform [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 1-10.
- [11] Tang J, Yang H J, Xu Q, et al. Analysis of the transfer characteristics of one-dimensional photonic crystal and its application with transfer matrix method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 76-80. (in Chinese)
- [12] Mao Y, Zhu J, Li K, et al. Dual-input concave diffraction grating demultiplexer based on dielectric multidirectional reflectors [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2020, 37(2): 316-316.
- [13] Xiong Y L, Xu D X, Schmid J H, et al. High extinction ratio and broadband silicon TE-pass polarizer using subwavelength grating index engineering [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(5): 1-7.
- [14] Kim D W, Lee M H, Kim Y, et al. Ultracompact transverse magnetic mode-pass filter based on one-dimensional photonic crystals with subwavelength structures [J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21560-21565.
- [15] Gong Y, Wang L, Hu X, et al. Broad-bandgap and low-sidelobe surface plasmon polariton reflector with Bragg-grating-based MIM waveguide [J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 13727-13736.
- [16] Sun M, Long J Y, Li X H, et al. Widely tunable Tm: LuYAG laser with a volume Bragg grating [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(8): 553.