

绝缘体上硅为平台的氮氧化硅波导及马赫 - 泽德尔干涉仪结构的研究

崔 航, 孙德贵*

长春理工大学理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2022年3月3日; 录用日期: 2022年4月4日; 发布日期: 2022年4月13日

摘 要

绝缘体上硅(silicon-on-insulator, SOI)作为光波导的技术平台已在有源和无源光子集成器件中表现出巨大优势。然而, SOI波导过大的折射率差决定了非对称性的很小波导几何尺寸, 从而造成较大的光传输损耗、光学耦合与干涉器件过大的偏振相关性和过大的波导 - 光纤耦合损耗等固有缺陷。本文研究了SOI上以氮氧化硅为芯层氧化硅为包层的波导(简称为氮氧化硅波导)单模条件及由此构成的马赫 - 泽德尔(MZI)结构, 建立了计算光损耗的理论模型。首先, 对单模氮氧化硅波导的有效折射率范围和尺寸范围进行了确定, 进而对氮氧化硅的直接耦合(DC)型耦合器的传输损耗和耦合区长度 L_c 的影响进行了系统性模拟, 并对MZI结构进行了研究。

关键词

硅基波导, 氮氧化硅波导, 马赫 - 泽德尔干涉仪(MZI)

Study on Silicon Oxynitride Waveguide and Mach-Zehnder Interferometer Structure on Silicon-on-Insulator Platform

Hang Cui, Degui Sun*

School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Mar. 3rd, 2022; accepted: Apr. 4th, 2022; published: Apr. 13th, 2022

Abstract

As a technology platform of optical waveguides, silicon-on-insulator (SOI) has shown great advantages. However, the large refractive index difference of SOI waveguide determines the small waveguide geometry size of non-symmetry, which causes large optical transmission loss, optical coupling and interference device large polarization correlation and large waveguide - fiber coupling loss etc. inherent defects. This paper studies the single-mode conditions and the Mach-Zehnder (MZI) structure composed of silicon oxynitride waveguide on silicon-on-insulator (SOI) platform, and establishes the theoretical model of calculating optical loss. First, the effective refractive index range and size range of single-mode silicon oxynitride waveguide are determined, and the influence of the transmission loss and coupling length L_c of the direct coupling (DC) type coupler of silicon oxynitride on the transmission loss and coupling length L_c is simulated systematically, and the MZI structure is studied.

*通讯作者。

文章引用: 崔航, 孙德贵. 绝缘体上硅为平台的氮氧化硅波导及马赫-泽德尔干涉仪结构的研究[J]. 传感器技术与应用, 2022, 10(2): 169-176. DOI: 10.12677/jsta.2022.102021

tages in active and passive photonic integrated devices. However, the large refractive index difference of SOI waveguide determines the small geometrical size of the asymmetric waveguide, which leads to inherent defects such as high optical loss, high polarization dependence, and waveguide-fiber coupling loss. In this paper, both the single-mode condition and the Mach-Zehnder interferometer (MZI) construction of SOI waveguide with silicon oxynitride as core layer and silicon dioxide as cladding layer, which is simply called oxynitride waveguides, are studied, and the theoretical model is established. Then, the effective refractive index range and the other physical parameters of single-mode oxynitride waveguide are determined. Furthermore, the optical propagation loss of waveguides and its influence on the coupling zone length L_c of the directional coupler (DC) are systematically simulated, and the optical loss performance of MZI construction is investigated.

Keywords

Silicon-Based Waveguide, Silicon Oxynitride Waveguide, Mach-Zehnder Interferometer (MZI)

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

绝缘体上硅(silicon-on-insulator, SOI)目前已经成为被广泛接受的光子集成电路(PLC)技术平台之一,因此对光子学集成器件和系统的开发有着重要作用。作为光信号切换功能的操作单元,马赫-泽德尔干涉仪(MZI)是最常见的机制之一,而光传输损耗(OPL)是光波导器件的核心问题[1]-[6]。然而,SOI波导过大的折射率差决定了非对称型的小波导结构与几何尺寸,进而造成较大的光损耗、光学耦合与干涉器件过大的偏振相关性和波导光纤耦合损耗等固有缺陷[7]-[13]。

现代光通信网络普遍应用的密集波分复用(DWDM)系统中,开发了各种基于MZI的光波导开关,通过高效控制光相位实现两个输入端和两个输出端之间的光开关功能。因此,基于传统的波导技术 Nagai 等人于 2002 年报道了一种基于多模干涉(multimode interference, MMI)型耦合器的 MZI 的 2×2 光开关,并对 MZI 结构的光相位响应过程进行了优化[14]。之后,在本课题组的前期工作中,利用优化的氧化硅波导 MZI 开关,于 2007 年发表了小尺寸 8×8 无阻塞矩阵开关[15]。为了应对新的应用需求,2009 年 Van Campenhout 等人报道了由扩展型 MZI 结构实现的数字开关功能[16]。最新的代表性成果是由 Soref 在 2017 年报道的,由级联 MZI 结构实现的波长选择光开关(WSS) [17]。如此可见,氮氧化硅波导和基于 MZI 的光矩阵开关已经明确显示出巨大的应用潜力[18]。

本文在 SOI 平台上研究以氮氧化硅为芯层氧化硅为包层的波导,进而研究其 MZI 结构,对其传输损耗进行模拟研究以克服 SOI 波导的光损耗缺陷。同时,由于氮氧化硅波导的芯层折射率可以调整,有利于对波导通道间的耦合与干涉器件的性能优化。另外,相比于传统的氧化硅波导,由于折射率差的大幅度增大使包层和芯层的厚度大幅度减小,从而大大降低了加工难度。为其在光开关及其他光子集成器件中的应用奠定技术基础。

2. 氮氧化硅波导芯层几何尺寸的理论模型

图 1 是氮氧化硅脊型波导和条型波导的横截面结构,其中波导折射率差变化和波导芯层几何尺寸变

化可以用来优化单模条件, 同时也对导波模式的分布产生影响。

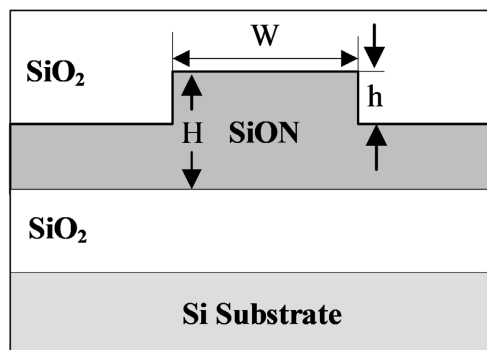


Figure 1. Schematic diagram of standard ridged waveguide cross section

图 1. 标准脊型波导横截面示意图

2004 年 G. T. Reed 等人提出了波导几何参数的理论模型, 被认为是可以接受的通用性模型。

$$\frac{W}{H} \leq 0.3 + \frac{r}{\sqrt{1-r^2}}; r = \frac{h}{H} \geq 0.5 \quad (1)$$

方程(1)中, W 是脊宽, h 和 H 分别称为外脊高和内脊高, 其实内脊高 h 就是 SiON 波导的芯层厚度。

在设计波导的几何尺寸满足方程(1)所定义的条件后, 使用 FD-BPM 软件进行模拟, 确定由氮氧化硅为芯层氧化硅为包层的脊型波导的有效折射率范围。根据以前的研究结果, 在波长为 1550 nm, 设定芯层氮氧化硅的厚度为: $H = 2.0 \mu\text{m}$, 折射率为 1.95 时, 模拟结果总结在表 1 中:

Table 1. The better effective refractive index of silicon oxynitride ridge waveguide under partial single mode condition
表 1. 部分单模条件下氮氧化硅脊型波导比较好的有效折射率的值

h (μm) \ / W (μm)	0.5	1.0	1.5
1.5	1.93468TE/Not found TM	1.91196TE/1.90130TM	1.88895TE/1.88528TM
2.0	1.93468TE/Not found TM	1.91929TE/1.90966TM	1.90895TE/1.90230TM
2.5	1.93468TE/Not found TM	1.92261TE/1.91319TM	1.91594TE/1.90838TM
3.0	1.93469TE/Not found TM	1.92605TE/1.91675TM	1.92223TE/1.91395TM
3.5	1.93469TE/Not found TM	1.92765TE/1.91838TM	1.92488TE/1.91633TM

从表 1 中可以看出, 不同的脊高: $0.5 \mu\text{m}$, $1.0 \mu\text{m}$ 和 $1.5 \mu\text{m}$, 对于所有脊宽值($W = 1.5 \sim 3.5 \mu\text{m}$), TE 模式下波导均为单模, 而且每一个脊高中有效折射率随脊宽变化很小, 但是脊高为 $0.5 \mu\text{m}$ 时, 对应所有的脊宽值, TM 模式都不存在。有效折射率值也都非常接近, 说明这个氮氧化硅波导结构, 有效折射率对脊宽和脊高的变化并不敏感。以上氮氧化硅波导脊波导的特性对于形成干涉与耦合型光波导器件非常有利, 因为这样的器件的性能对波导加工容错性非常高。考虑到氮氧化硅波导加工精度方面的影响, 所以, 选择外脊高为 $1.2 \mu\text{m}$, 脊宽从 $1.5 \mu\text{m}$ 选取到 $3.5 \mu\text{m}$ 。氮氧化硅的折射率在 $1.47 \sim 2.30$ 内是可调的, 所以取 $1.8 \sim 2.3$, 模拟了单模条件下有效折射率对这两个参数的同步依赖关系, 获得了 TE 和 TM 模式的有效折射率分布图, 分别如图 2(a)和图 2(b)所示。

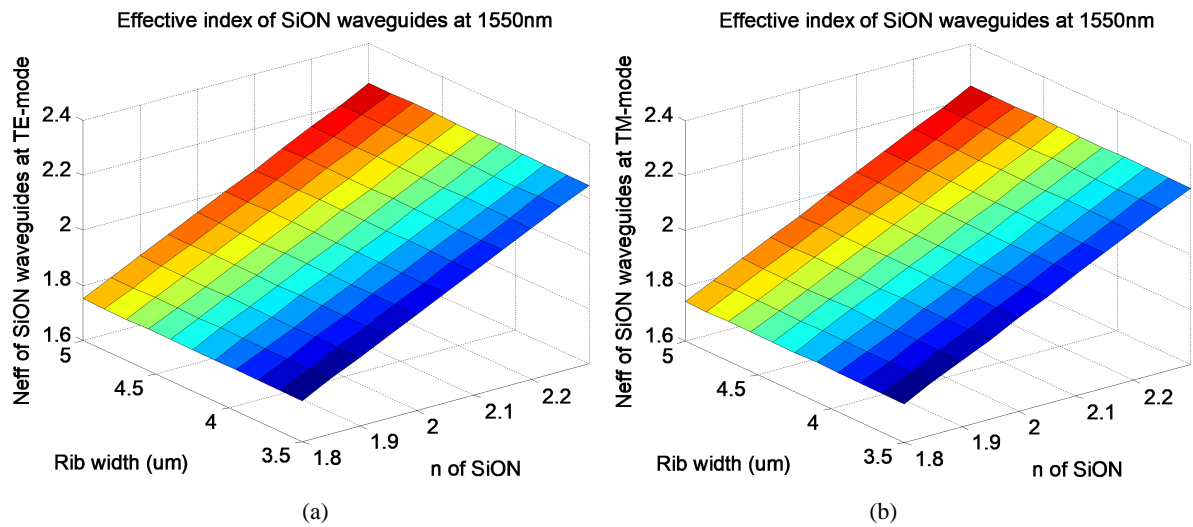


Figure 2. Three-dimensional distribution of effective refractive index of silicon oxynitride ridge waveguide with waveguide width and silicon oxynitride refractive index: (a) TE mode; (b) TM mode

图 2. 氮氧化硅脊型波导有效折射率随波导宽度和氮氧化硅折射率的三维分布图: (a) TE 模式; (b) TM 模式

从此图中, 我们对单模分布范围有了整体感, 即氮氧化硅波导在单模条件下其有效折射率随着波导脊宽和氮氧化硅芯层的折射率都表现出线性依赖关系, 而且是线性依赖关系, 这样对选择波导结构实现光波导功能器件的性能指标有了重要的参考。从如图 2(a)和图 2(b)的比较中可以看出, TE 和 TM 模式之间的有效折射率差距非常小, TM 模式下的有效折射率要微小于 TE 模式下的有效折射率, 这种情况是区别于以前的 SOI 波导的。经过分析发现, TE 和 TM 模式之间的有效折射率差如此小的原因是由于氮氧化硅波导芯层材料和包层材料(氮氧化硅和氧化硅)之间的折射率差很小。所有这些信息不仅为波导结构的选择提供了直接的数据, 而且也为后面的 MZI 结构在偏振相关性方面有所帮助。因此, 为进行 BPM 软件模拟, 我们分别选取了 BOX 层厚度为 $3.0\ \mu\text{m}$, 上包层厚度为 $3.0\ \mu\text{m}$, $W = 2.0\ \mu\text{m}$, $h = 1.2\ \mu\text{m}$ 和 $W = 2.5\ \mu\text{m}$, $h = 1.2\ \mu\text{m}$ 进行接下来的器件仿真模拟。

3. 氮氧化硅波导基于 DC 型耦合器的 MZI 结构理论模型

图 3 所示的是 MZI 结构原理图, 其中的 3 dB 耦合器是 DC 型 2×2 耦合器结构, 来自光源的光束经过耦合器 1, 将光束一分为二, 一臂为直通臂, 另一臂为交叉臂。经过耦合器 2 进行干涉, 使其中一个输出端得到高功率光输出, 而另一个输出端得到 0 或者绝对低的功率输出, 并运用此器件计算系统的光损耗和输出端隔离度, 以及每个光的输出值的偏振相关性。

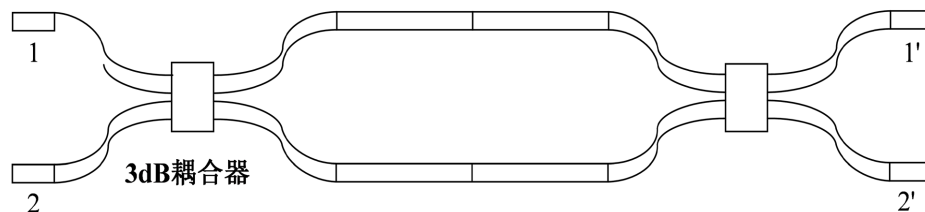


Figure 3. Schematic diagram of MZI structure based on DC type coupler

图 3. 基于 DC 型耦合器的 MZI 结构示意图

如果两个 3 dB 耦合器的耦合比和直通比分别为 κ 和 τ , 两臂光衰减系数和二者之间的光相位差分别

为 α_{arm} 和 ϕ_{arm} , 对于归一化输入光波电场强度 ($E_m = 1.0$), 在输入端口 1 有两个电场强度为 E_1 和 E_2 可以定义为:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \tau & \kappa^* \\ \kappa & -\tau^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_{arm} e^{i\phi_{arm}} & 0 \\ 0 & \alpha_{arm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tau & \kappa^* \\ \kappa & -\tau^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

于是, 两输出端口光强度输出分别为: $I_i = E_i \cdot E_i^*$, 其中 $i=1,2$ 分别代表输出端 1 和 2, 符号*代表复数共轭。利用有限差分算法 - 光束传播法(FD-BPM), 可得单模有效折射率 N_{eff} 值, 进而获得导波模式的传输常数为: $\beta_m = (2\pi/\lambda)N_{eff}$, 则其光损耗系数 $\alpha_{3D}(m)$ 则由下式定义(dB/cm) [11]:

$$\alpha_{mzi}(m) \approx \alpha_{arm}(m) = \alpha_{3D}(m) = 4.34 \left(\frac{\sigma_{3D}^2(m)}{\sqrt{2}d^4\beta_m} g(V) \cdot f_e(x, \gamma) \right), \quad (3)$$

其中 $\sigma_{3D}(m)$ 是波导的三维(3-D)侧壁粗糙度(SWR), 偏振模式分别代表 TE 和 TM 模式, 所以 β_m 是导引模式在给定偏振模式下的光传播常数。

4. 利用 FD-BPM 优化设计 DC 型 2×2 耦合器结构

对于 DC 型 3 dB 耦合器, 根据之前已确定波导的几何参数即 $W = 2.0 \mu\text{m}$, $h = 1.2 \mu\text{m}$ 和 $W = 2.5 \mu\text{m}$, $h = 1.2 \mu\text{m}$ 两组数据, 我们通过模拟确定了耦合器尺寸: 几何参数包括耦合区直波导间距和长度的数值, 研究输出端的分束比对与波导几何尺寸误差依赖性最小, 以至于不会对由此构成的 MZI 型波导器件的性能受加工误差的影响。

在模拟过程中通过比较发现, 对于 3 dB 耦合器, 其耦合区直波导间长度 L_c 可以控制的越小, 但是由于现阶段的模拟是为以后的芯片器件加工提供理论和数据依据, 考虑到芯片器件的光损耗限制。把直波导长度控制在 $1000 \mu\text{m}$ 以内。最后, 在考虑加工精度和芯片器件性能要求的前提下, 把耦合区直波导间距设在 $2.0 \mu\text{m}$ 以下。

通过模拟确定了以下数据与结论, 在耦合区直波导间距 $s = 2.0 \mu\text{m}$ 的情况下, $W = 2.0 \mu\text{m}$, $h = 1.2 \mu\text{m}$, $L_c = 198.5 \mu\text{m}$ 时, 两端输出极为接近且损耗极小, 上端输出为 0.496886, 下端输出为 0.496496。总损耗仅不足 1%; 在 $s = 1.5 \mu\text{m}$ 的情况下, $W = 2.5 \mu\text{m}$, $h = 1.2 \mu\text{m}$, $L_c = 242 \mu\text{m}$ 时, 两端输出极为接近且损耗极小, 上端输出为 0.498020, 下端输出为 0.496527, 损耗同样极小。FD-BPM 软件模拟过程中还发现对于氮氧化硅为芯层氧化硅为包层的波导, 若兼顾到器件加工和性能要求等因素, TE 模式优于 TM 模式。图 4(a)和图 4(b)分别为 TE 和 TM 模式下 $3.5 \mu\text{m}$ 脊型波导 DC 型 3 dB 耦合器的光路模拟图。从图 4(a)和图 4(b)中可以发现 TE 模式下的光传输与几何尺寸之间的关系较为明显。则发现了氮氧化硅波导 TE 和 TM 模式下的 MZI 结构光交叉端输出特性的不同。

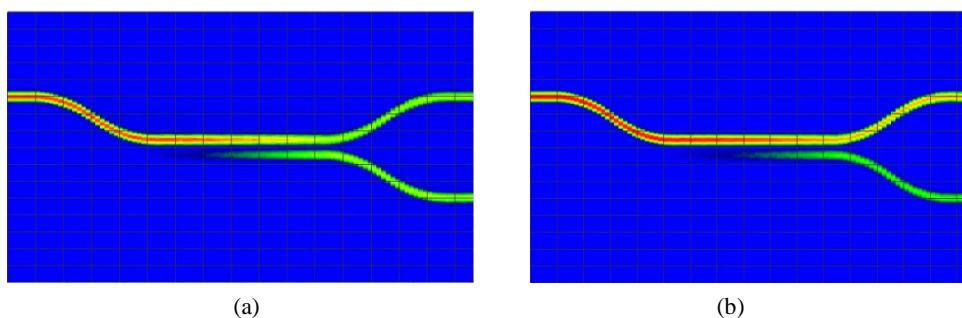


Figure 4. Optical path diagram of 3 dB coupler in TE and TM mode: (a) TE mode; (b) TM mode
图 4. TE 和 TM 模式下 3 dB 耦合器模拟光路图: (a) TE 模式; (b) TM 模式

在获得较好的 3 dB 耦合器的各项几何尺寸后,进而与软件模拟相结合模拟基于 DC 型耦合器(coupler)的 MZI 结构的光输出性能。对于 MZI 结构,一共模拟两组数据,分别为 $W = 2.0 \mu\text{m}$, $h = 1.2 \mu\text{m}$, $s = 2.0 \mu\text{m}$, $L_c = 198.5 \mu\text{m}$ 以及 $W = 2.5 \mu\text{m}$, $h = 1.2 \mu\text{m}$, $s = 1.5 \mu\text{m}$, $L_c = 242 \mu\text{m}$ 。对于 TE 模式而言,这两种几何尺寸下较大输出端的输出分别为 0.998178 和 0.999579;对于 TM 模式而言,两种几何尺寸下较大输出端的输出分别为 0.829038 和 0.846441。

于是,我们可以得出 MZI 结构相对符合要求的几何尺寸,包括器件总体尺寸设定,上包层和 BOX 厚度设定和器件细节部分的几何参数。图 5 为符合设计要求的,模拟光路图。

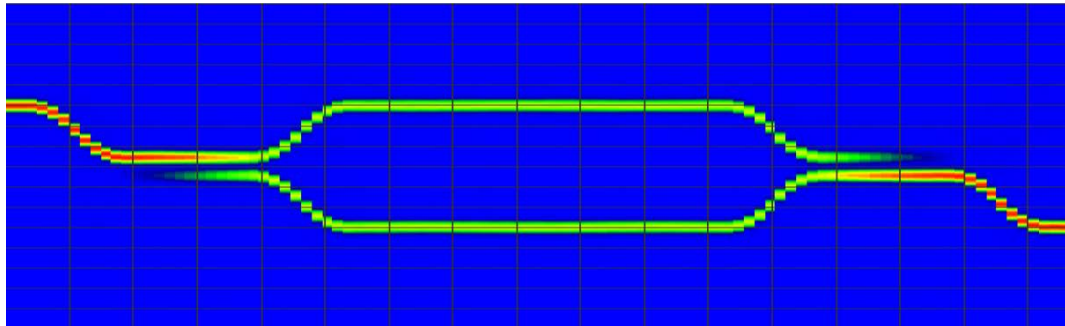


Figure 5. Silicon oxynitride waveguide based on DC coupler design in line with the expected effect of the optical path diagram

图 5. 氮氧化硅波导基于 DC 耦合器设计的符合预期效果的光路图

从图 5 中的模拟结果获得:两个结构(2.0 μm 和 2.5 μm)在交叉输出端 TE 模式的结果分别为:0.998178 和 0.999579。TM 模式的模拟结果分别是: 0.971324 和 0.969891。目前,能够在 SOI 基底上加工氮氧化硅波导器件,波导在宽度方面的最大加工误差是 $\pm 0.15 \mu\text{m}$ 。于是,对于 2.0 μm 宽波导而言,对波导宽度为 $2.0 - 0.15 \mu\text{m}$ (即 1.85 μm)和 $2.0 + 0.15 \mu\text{m}$ (即 2.15 μm)两个极限误差值进一步模拟,获得 TE 模式下在交叉输出端的 MZI 结构输出值分别为: 0.961602 和 0.978111;获得 TM 模式下在交叉输出端的 MZI 结构输出值分别为: 0.928514 和 0.767389。

对于 2.5 μm 宽波导而言,对波导宽度为 $2.5 - 0.15 \mu\text{m}$ (即 2.35 μm)和 $2.5 + 0.15 \mu\text{m}$ (即 2.65 μm)两个极限误差值进一步模拟,获得 TE 模式下两个极限值状态的 MZI 结构输出值分别为:0.942914 和 0.976493;获得 TM 模式下两个极限值状态的 MZI 结构输出值分别为: 0.919371 和 0.746101。对以上两个波导宽度及其加工误差极限值处的 MZI 结构输出值特性分别总结在表 2(a)和表 2(b)中。

Table 2. Cross output of MZI structure at 2.0 μm and 2.5 μm wide waveguides and their limit errors

表 2. 2.0 μm 和 2.5 μm 宽波导及其极限误差处的 MZI 结构交叉输出

(a): $W = 2.0 \mu\text{m}$						
偏振态模式	TE-模式			TM-模式		
宽度 $W (\mu\text{m})$	1.85	2.0	2.15	1.85	2.0	2.15
MZI 交叉端输出	0.961602	0.999579	0.978111	0.928514	0.846441	0.767389
(b): $W = 2.5 \mu\text{m}$						
偏振态模式	TE-模式			TM-模式		
宽度 $W (\mu\text{m})$	2.35	2.5	2.65	2.35	2.5	2.65
MZI 交叉端输出	0.942914	0.998178	0.976493	0.919371	0.829038	0.746101

从表 2(a)和表 2(b)中可以发现, 对于这两个波导宽度而言, MZI 型器件的光输出性能, TM-模式受加工误差的影响要比 TE-模式大的多。

5. 结论

由理论研究和以上软件模拟结果可以得出结论, 氮氧化硅为芯层氧化硅为包层的波导可以使有效折射率非常均匀, 而且 TE 和 TM 模式之间的差距也非常小。模拟结果还显示, 这种波导的 MZI 型光学器件在偏振相关性和光学性能对加工误差依赖性方面不仅要比同结构的 SOI 波导器件优越得多, 而且与同结构的氧化硅波导器件相比在偏振相关性和光学性能对加工误差依赖性两个方面都具有优越性, 而且加工难度要比 SiO₂ 波导小得多。因此, 氮氧化硅波导有利于 MZI 型光开关等功能器件的研究与应用, 尤其在本文对氮氧化硅波导基于 DC 型耦合器的 MZI 结构进行研究后, 为氮氧化硅波导在光开关及其他光子集成器件中的应用奠定技术基础。

致 谢

作者感谢姜伦教授、孔梅教授和陈晨教授在实验中给予的帮助。

基金项目

该工作由吉林省人力资源和社会保障厅人才计划基金(批准号: 634190874002)和吉林省科技厅自然科学基金(批准号: 201801223JC)共同资助。

参考文献

- [1] Doerr, C.R. and Okamoto, K. (2008) Planar Lightwave Circuits in Fiber-Optic Communications. In: Kaminow, I.P., Li, T. and Willner, A.E., Eds., *Optical Fiber Telecommunications*, Academic Press, Cambridge, 269-341. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374171-4.00009-5>
- [2] Murphy, E.J. (1999) *Integrated Optical Circuits and Components: Design and Applications*. CRC Press, Boca Raton.
- [3] Chrostowski, L. and Hochberg, M. (2015) *Silicon Photonics Design: From Devices to Systems*. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316084168>
- [4] Orcutt, J.S., Moss, B., Sun, C., Leu, J., Georgas, M., Shainline, J., et al. (2012) Open Foundry Platform for High-Performance Electronic-Photonic Integration. *Optics Express*, **20**, 12222-12232. <https://doi.org/10.1364/OE.20.012222>
- [5] Dumon, P., Bogaerts, W., Wiaux, V., Wouters, J., Beckx, S., Van Campenhout, J., et al. (2004) Low-Loss SOI Photonic Wires and Ring Resonators Fabricated with Deep UV Lithography. *IEEE Photonics Technology Letters*, **16**, 1328-1330. <https://doi.org/10.1109/LPT.2004.826025>
- [6] Tsuchizawa, T., Yamada, K., Fukuda, H., Watanabe, T., Takahashi, J., Takahashi, M., et al. (2005) Microphotonic Devices Based on Silicon Microfabrication Technology (Invited Paper). *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **11**, 232-240. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2004.841479>
- [7] Marcuse, D. (2014) Radiation Losses of Dielectric Waveguides in Terms of the Power Spectrum of the Wall Distortion Function. *Bell System Technical Journal*, **48**, 3233-3242. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01744.x>
- [8] Payne, F.P. and Lacey, J. (1994) A Theoretical Analysis of Scattering Loss from Planar Optical Waveguides. *Optical and Quantum Electronics*, **26**, 977-986. <https://doi.org/10.1007/BF00708339>
- [9] Barwicz, T. (2005) Three-Dimensional Analysis of Scattering Losses Due to Sidewall Roughness in Microphotonic Waveguides. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, Baltimore, 22-27 May 2005, 1333-1335. <https://doi.org/10.1109/CLEO.2005.202116>
- [10] Poulton, C.G., Koos, C., Fujii, M., Pfrang, A., Schimmel, T., Leuthold, J., et al. (2006) Radiation Modes and Roughness Loss in High Index-Contrast Waveguides. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **12**, 1306-1321. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2006.881648>
- [11] Shang, H.P., Sun, D.G., Yu, P., Wang, B., Yu, T., Li, T. and Jiang, H. (2020) Investigation for Sidewall Roughness Caused Optical Scattering Loss of Silicon-on-Insulator Waveguides with Confocal Laser Scanning Microscopy. *Coatings*, **10**, Article No. 236. <https://doi.org/10.3390/coatings10030236>

- [12] Sun, D.G., Hu, Z.M., Abdule-Majid, S., Vandusen, R., Zheng, Z., Hasan, I., Tarr, N.G., Bidnyk, S. and Hall, T.J. (2011) Limitation Factor Analysis for Silicon-on-Insulator Waveguide Mack-Zehnder Interference Based Electrooptic Switches. *Journal of Lightwave Technology*, **29**, 2592-2600. <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2161573>
- [13] Papadimitriou, G.I., Papazoglou, C. and Pomportsis, A.S. (2003) Optical Switching: Switch Fabrics, Techniques, and Architectures. *Journal of Lightwave Technology*, **21**, 384-405. <https://doi.org/10.1109/JLT.2003.808766>
- [14] Nagai, S., Morishima, G., Inayoshi, H. and Utaka, K. (2002) Multimode Interference Photonic Switches (MIPS). *Journal of Lightwave Technology*, **20**, 675-681. <https://doi.org/10.1109/50.996588>
- [15] Sun, D.G., Zha, Y., Liu, T., Zhang, Y., Li, X. and Fu, X. (2007) Demonstration for Rearrangeable Nonblocking 8×8 Matrix Optical Switches Based on Extended Banyan Networks. *Optics Express*, **15**, 9347-9356. <https://doi.org/10.1364/OE.15.009347>
- [16] Van Campenhout, J., Green, W.M., Assefa, S. and Vlasov, Y.A. (2009) Low-Power, 2×2 Silicon Electro-Optic Switch with 110-nm Bandwidth for Broadband Reconfigurable Optical Networks. *Optics Express*, **17**, 24020-24029. <https://doi.org/10.1364/OE.17.024020>
- [17] Soref, R. (2017) Design of Low-Energy On-Chip Electro-Optical $1 \times M$ Wavelength-Selective Switches. *Photonics Research*, **5**, 340-345. <https://doi.org/10.1364/PRJ.5.000340>
- [18] Cheng, Q., Bahadori, M., Glick, M., Rumley, S. and Bergman, K. (2018) Recent Advances in Optical Technologies for Data Centers: A Review. *Optica*, **5**, 1354-1370. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.001354>