

# 绝缘体上硅波导质量对马赫 - 泽德尔干涉仪光学性能的影响

刘 川, 陈 晨, 孙德贵\*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2021年12月21日; 录用日期: 2022年1月20日; 发布日期: 2022年1月27日

## 摘 要

SOI波导被公认为光子集成电路(PIC)最有前途的平台, 本文研究了SOI波导马赫 - 泽德尔干涉仪(MZI)型  $2 \times 2$ -光开关光学性能对波导加工质量的依赖性, 建立了理论模型。进而, 系统模拟了波导侧壁粗糙度(SWR)对芯片上光损耗(OCL)的影响, 分析了脊宽误差(RWE)对器件输出端口的串扰(XT)效应。结果表明, 对于芯层厚度为 $2.0 \mu\text{m}$ 和脊宽为 $2.0 \mu\text{m}$ 的SOI波导, MZI型器件的光输出性能的两个依赖性:  $\text{OCL}/\text{SW} = 0.5 \text{ dB/nm}$ ,  $\text{XT}/\text{RWE} = 1.2 \text{ dB/nm}$ , 实验结果与此结果一致。因此, 本项成果可为MZI-PIC器件的设计提供数据基础。

## 关键词

SOI波导, 马赫 - 泽德尔干涉仪(MZI), 侧壁粗糙度(SWR), 脊宽误差(RWE)

# Quality Effect of Silicon-on-Insulator Waveguides on Optical Specifications of Mach-Zehnder Interferometer Construction

Chuan Liu, Chen Chen, Degui Sun\*

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

Received: Dec. 21<sup>st</sup>, 2021; accepted: Jan. 20<sup>th</sup>, 2022; published: Jan. 27<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Due to the numerous achievements in the research and development of silicon-on-insulator (SOI)

\*通讯作者。

waveguides and some functional devices, SOI waveguide is envisaged to be the most promising platform in photonic integrated circuits (PIC). This article systematically investigates the dependences of optical performance of Mach-Zehnder interferometer (MZI) based  $2 \times 2$  optical switch on the fabrication quality of waveguide, leading to a theoretical model. Then, systematically simulates the impact of SWR on the OCL and the effect of RWE on the XT. The results show that for a  $2.0 \mu\text{m}$  wide rib waveguide on a  $2.0 \mu\text{m}$  thick silicon film, the output performance of MZI based device has the dependence as  $\text{OCL}/\text{SWR} = 0.5 \text{ dB/cm}$  and  $\text{XT}/\text{RWE} = 1.2 \text{ dB/cm}$ . Finally, the experimental results agree with the above simulations.

## Keywords

SOI Waveguide, Mach-Zehnder Interferometer, Sidewall Roughness, Rib Width Error

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/>



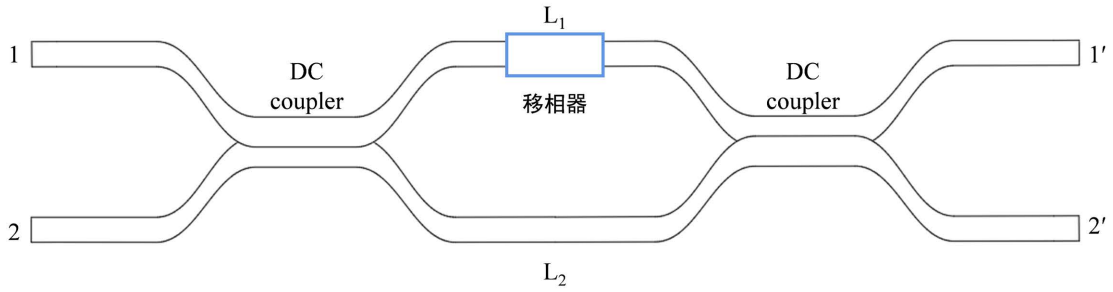
## 1. 引言

绝缘体上硅(SOI)是目前被广泛接受的光子集成电路(PIC)的技术平台之一,在器件与系统的研究和开发中一直起着重要作用。因此,自21世纪初以来,基于SOI波导的PIC器件已经显示出前所未有的潜力,涵盖了电光调制器、光开关、开关矩阵和可变光衰减器等组件[1]-[6]。其中,折射率调制主要包括硅薄膜的自由载流子色散(FCD)效应和热光(TO)效应,器件结构包括偏振分光器、光微型谐振环(MRR)和波分复用器(WDM)等[7] [8] [9] [10]。对于上述系统,作为完成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SOI光波导器件的核心问题,主要来源是波导制造过程中不可避免的侧壁粗糙度(SWR)引起的光散射,同时也依赖于波导宽度[11]。例如,SOI条形波导的平均光损耗约为  $0.24 \text{ dB/mm}$  [12],而小面积平板SOI波导的光损耗约为  $1.3 \text{ dB/mm}$  [13]。

在现代密集波分复用(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在2002年Nagai等人报道了一种基于多模MZI的 $2 \times 2$ 光开关,并对MZI结构的光相位响应过程进行了优化[14]。之后,在我们前期的工作中,利用优化的氧化硅波导MZI开关,于2007年发表了小尺寸 $8 \times 8$ 无阻塞矩阵开关[15]。为了应对新的应用需求,2009年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]。由此可见,光阵列和基于MZI的光矩阵开关已经明确显示出巨大的应用潜力[18]。

## 2. 理论模型

图1是波导MZI型 $2 \times 2$ 热光开关的通用结构,由两个3 dB耦合器和两个臂组成,连接两个输入端口和两个输出端口,其中脊型波导是在 $2.0 \mu\text{m}$ 厚的硅膜和 $2.0 \mu\text{m}$ 厚的二氧化硅BOX层上制作的,脊宽为 $2d$ ,芯层和包层折射率分别为 $n_1$ 和 $n_2$ ;且有两个3 dB定向耦合器(DC)和一个移相器被制作在一个臂上,使两个臂之间产生光相位差 $\pi$ 。本文中,设定两个3 dB-DC的耦合比并研究MZI结构的关键损耗性能指标:插入损耗(IL)、偏振相关损耗(PDL)和两个输出之间的隔离度(ISO)与SWR引起的光损耗的相关性。



**Figure 1.** Schematic diagram of the MZI-type  $2 \times 2$  optical switch based on SOI ridge waveguide  
**图 1.** 基于 SOI 脊波导的 MZI 型  $2 \times 2$  光开关示意图

如果两个 3 dB 耦合器的耦合比和直通比分别为  $\kappa$  和  $\tau$ ，两臂光衰减系数和二者之间的光相位差分别为  $\alpha_{arm}$  和  $\phi_{arm}$ ，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：

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

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。

利用有限差分算法的 - 光束传播法(FD-BPM)，可得单模有效折射率  $N_{eff}$  值，则其光损耗系数  $\alpha_{3D}(m)$  则由下式定义(dB/cm) [11]：

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

其中  $\alpha_{3D}(m)$  是三维(3-D)SWR，偏振模式分别代表 TE 和 TM 模式，所以  $\beta_m$  是导引模式在给定偏振模式下的光传播常数。在公式(2)中两个重要的传递函数  $g(V)$  和  $f_e(x, \gamma)$  被定义为：

$$g(V) = \frac{h^2 V^2}{1 + p^2}, \quad f_e(x, \gamma) = \frac{\left\{ \left[ (1+x^2)^2 + 2x^2 \gamma^2 \right]^{1/2} + 1 - x^2 \right\}^{1/2}}{\left[ (1+x^2)^2 + 2x^2 \gamma^2 \right]^{1/2}} \quad (3)$$

其中  $g(V)$  是波导归一化频率  $V$  的函数， $f_e(x, \gamma)$  是用来确定相关长度  $L_c$  与参数  $x$  和  $\gamma$  峰值的。当波数  $k_0 = 2\pi/\lambda$  时三个定义导引模式的参数  $h$ 、 $V$  和  $p$  可以分别定义为[3] [4]：

$$h = d\sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2}, \quad V = k_0 d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad p = d\sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2} \quad (4)$$

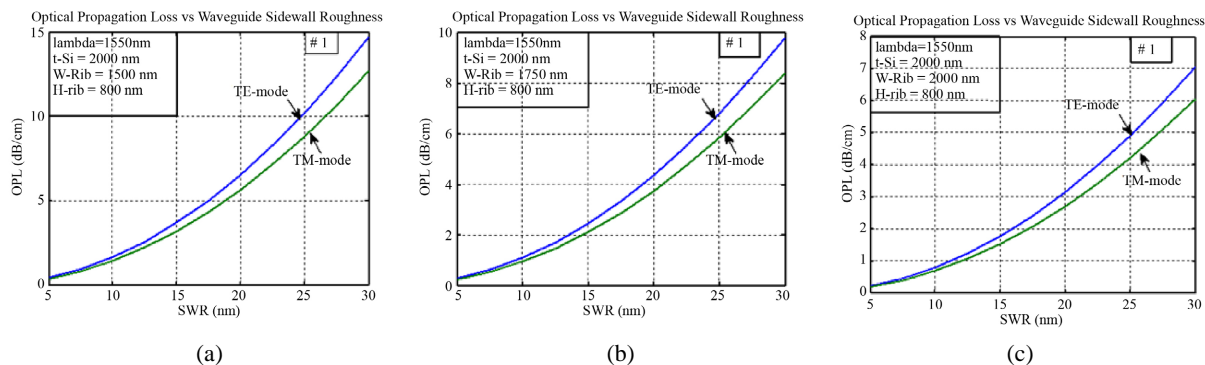
在公式中，进一步确定其他无量纲参数为： $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / (2n_1^2)$ 、 $x = p(L_c/d)$  和  $\gamma = (n_2 V) / (n_1 p \sqrt{\Delta})$ 。

### 3. SOI 波导 MZI 型光开关的性能模拟

#### SOI OPL 对 SWR 和波导尺寸的双重依赖的数值模拟

对于图 1 所示的 SOI 波导 MZI 结构，我们选择的非晶硅(a-Si)薄膜，厚度为 2.0  $\mu\text{m}$ ，折射率为 2.95，其中  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ，二氧化物上下包层和厚度分别为 5.0  $\mu\text{m}$  和 3.0  $\mu\text{m}$ ，折射率均为 1.4551。然后，仍然用 FD-BPM 软件，模拟三个脊宽( $2d$ ): 1.5、1.75 和 2.0  $\mu\text{m}$ ，脊高为 0.8  $\mu\text{m}$ ，在单模条件下 TE/TM 模式的有效折射率分别为 2.8854/2.8633，2.8712/2.8621 和 2.8688/2.853365。进而利用公式(2)，我们获得了 TE 和

TM 模式的光传播损耗率  $\alpha_{3D}(m)$  对 SWR 依赖性, 分别如图 2(a)~(c)所示。

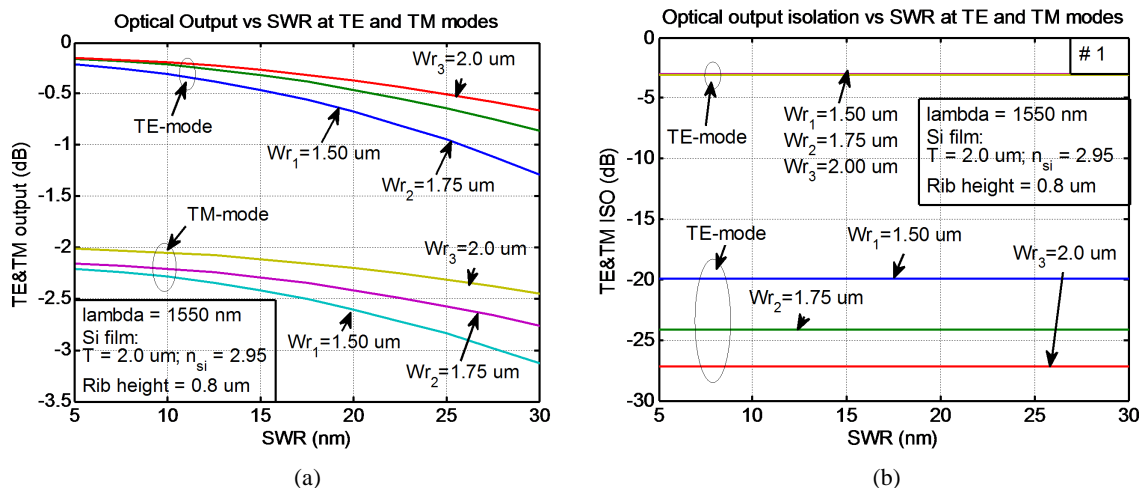


**Figure 2.** Numerical simulation results of optical propagation loss and polarization dependence due to SWR of SOI waveguide for (a)  $W_r = 1.50 \mu\text{m}$ , (b)  $W_r = 1.75 \mu\text{m}$  and (c)  $W_r = 2.00 \mu\text{m}$

**图 2.** SOI 波导的 SWR 引起的光传播损耗和偏振依赖性的数值模拟结果图, (a)  $W_r = 1.50 \mu\text{m}$ , (b)  $W_r = 1.75 \mu\text{m}$  和 (c)  $W_r = 2.00 \mu\text{m}$

从图 2 中所有曲线的比较可以看出,  $\alpha_{3D}(m)$  随着 SWR 的增大而快速升高, 也随着脊宽的增大而快速降低, 其原因可以直接从公式(2)中发现。比较三个图中的两条曲线的间距我们发现, TE 模式的  $\alpha_{3D}$  总是大于 TM 模式的, 而二者之差也随着 SWR 的增大而快速升高, 随着波导宽度的增大而减小。例如, 在  $\sigma_{3D}(m) = 20 \text{ nm}$  时, 在三个脊宽值的  $\alpha_{3D}(\text{TE}/\text{TM})$  值分别为 7.0/6.0、4.5/3.8 和 3.1/2.6 dB/nm, 这意味着  $\alpha_{3D}(\text{TE}) - \alpha_{3D}(\text{TM})$  分别为 1.0、0.7 和 0.5 dB/nm。众所周知, 基于 MZI 的光开关的光损耗相关性能指标主要包括插入损耗(IL)和串扰(XT)。

基于上述图 2 所示的模拟, 我们进一步模拟了  $\alpha_{3D}(\text{TE})$  和  $\alpha_{3D}(\text{TM})$  对脊宽  $W_{rib}$  和侧壁粗糙度  $\sigma_{3D}$  的双重依赖性, 进而将结果引入到方程(1)和(2), 得到了 MZI 结构在 TE 和 TM 模式的光输出如图 3(a)所示。从图 3 中不难看出输出端口的插入损耗(IL)会随着 SWR 增大不断增大, 而且随脊宽的减小快速增大, 而且 TE 和 TM 模式之间的差距很大, 所以说  $W_{rib}$  和  $\sigma_{3D}$  同时影响两输出值, 为此, 我们记录获得如图 3(b)



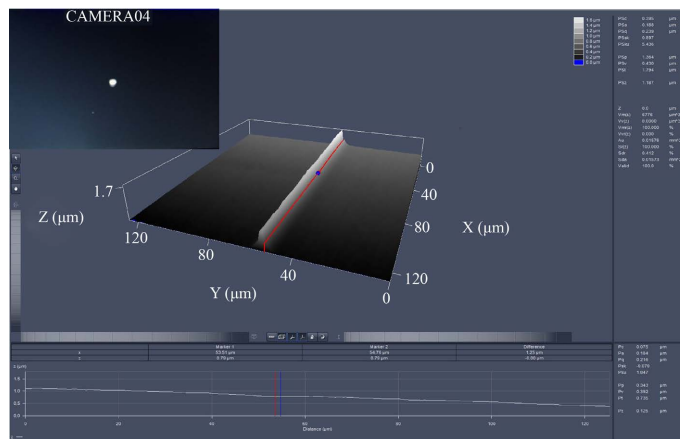
**Figure 3.** SOI waveguide MZI structure: (a) Optical insertion loss at the ON-state output port and (b) 3-D distributed optical isolation between the two output ports

**图 3.** SOI 波导 MZI 结构: (a) 在 ON 状态输出端口的光学插入损耗和 (b) 两个输出端口之间的 3-D 分布式光学隔离度

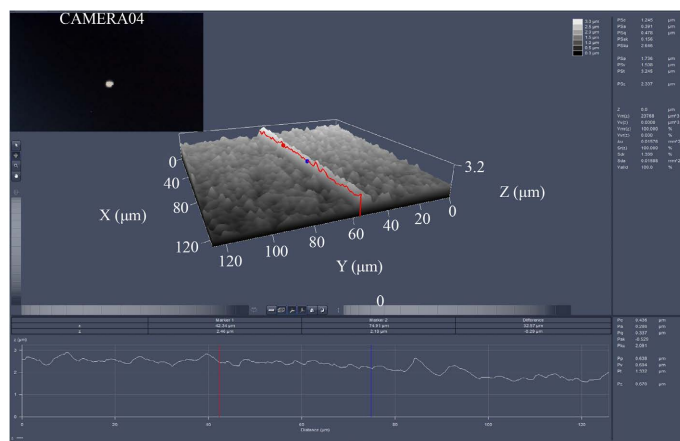
所示的两端口之间隔离度(ISO)。然后,由于模拟中我们仅在 TE 模式下设置了 50:50 耦合比的 3 dB 耦合器,可以看出 SWR 对于隔离度的影响较小,只随着宽度的减小而减小。比如,当  $W_r$  给定时,隔离度随 SWR 的变化基本上保持与光传播损耗结果一样的线性变化。值得强调的是,就图 3 的结果都可以看出, TM 模式的输出端的插入损耗和隔离度都已经远远低于设计要求,其原因是 MZI 结构中起关键作用的 3 dB 耦合器是针对 TE 模式优化的,所以只能应用与 TE 模式。同理,如果针对 TM 模式进行 3 dB 耦合器优化, MZI 结构的这性能就会适用于 TM 模式。因此,这里的模拟结果将对器件的开发有重要的参考性,还将在后面的一节通过实际加工器件的测试结果进行验证。

#### 4. 测量 SWR, SWR 引起的 SOI 波导的光传播损耗和 MZI 结构的光损耗性能

按上一节的模拟条件和结果,我们选定脊宽  $1.5\ \mu\text{m}$  和  $2.0\ \mu\text{m}$  波导的 MZI 结构进行光学性能测试。首先,利用蔡司公司生产的商用共聚焦显微镜(CLSM) LSM71 型对器件芯片的两个不同位置的 MZI 结构的  $2.0\ \mu\text{m}$  宽波导测量了 SWR 值,获得如图 4(a)和图 4(b)所示的不同粗糙度,分别为  $0.125\ \mu\text{m}$  和  $0.670\ \mu\text{m}$ 。进而,测量 MZI 结构输出端的导波模式,放在了所获得的 CLSM 测量图的左上角处。显而易见,图 4(a)所示的  $0.125\ \mu\text{m}$  粗糙度的导波模式较图 4(b)所示的  $0.670\ \mu\text{m}$  所示的模式更明亮,说明光强度损耗小。



(a)



(b)

**Figure 4.** SWR images measured by CLSM for (a) The smaller SWR case and (b) The larger SWR case

**图 4.** CLSM 测量的 SWR 图像:(a) 较小的 SWR 情况和(b) 较大的 SWR 情况

图5是用于MZI结构光损耗性能参数测试的装置,其中激光波长为1550 nm的光由偏振控制器转为线偏振光,经锥形透镜光纤与波导进行耦合,输出光纤则与示波器或者功率计相连。主要用于测试在TE和TM偏振模式下的两个输出值,进而计算在两个偏振模式下的隔离度。在测量中,光纤-光纤耦合输出值为-10.39 dBm,对于1.5  $\mu\text{m}$ 和2.0  $\mu\text{m}$ 两个脊宽 of MZI型 $2 \times 2$ 光开关结构,选择了TE和TM两个偏振态模式,获得了IL和输出端ISO的测量结果如表1中所列。综合上述理论计算与软件模拟结果和测试实验测试结果可以得出结论,SOI波导MZI结构中脊宽对于输出端ISO的影响很大,而其IL受脊宽和SWR的双重影响,而且当脊宽越大其IL受SWR的影响越小。更重要的一点已经在模拟与实验的结果中都得到了体现:IL和ISO受偏振模式影响较大。

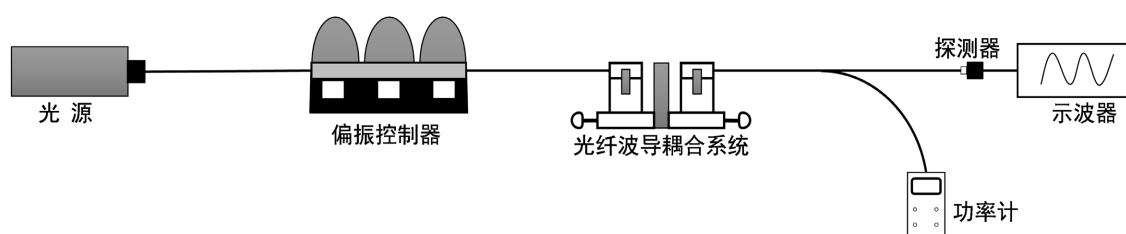


Figure 5. Optical waveguide MZI structure optical loss performance test device

图5. 光波导MZI结构光损耗性能测试装置

Table 1. Measurement results of optical loss characteristics of MZI structured devices

表1. MZI结构器件光损耗特性测量结果

脊宽: $W_{rib} = 1.5 \mu\text{m}$				脊宽: $W_{rib} = 2.0 \mu\text{m}$			
TE-mode		TM-mode		TE-mode		TM-mode	
IL (dB)	ISO (dB)	IL (dB)	ISO (dB)	IL (dB)	ISO (dB)	IL (dB)	ISO (dB)
11.93	8.94	O-1 > O-2	unnormal	11.14	12.92	O-1 > O-2	unnormal

## 5. 结论

通过研究SOI波导MZI型 $2 \times 2$ 光开关型的波导质量和光损耗性能有着很强的相关性,所以在器件设计中要对器件的光学性能及SWR和RWE的依赖性进行系统模拟与优化,而在加工过程中要从工艺和测量两个方面的精度进行严格控制。另外,在器件设计中要尽量选择脊宽大的(比如 $\geq 2.0 \mu\text{m}$ )的SOI脊型波导MZI型 $2 \times 2$ 光开关结构,且仅仅集中在TE或者TM一种模式。器件在加工中的脊宽误差和侧壁粗糙度要做到最小。本文的研究及其结论为SOI-PIC光子开关的波导结构设计以及对于侧壁粗糙度(SWR)对波导光损耗性能的影响提供了有力的数据支撑,为进一步开发和设计SOI-PIC光子开关提供了数据基础。

## 致 谢

作者感谢姜伦教授和孔梅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 VA*, 5th Edition, Academic Press, Cambridge, MA, 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*.
- [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., 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., 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., et al. (2005) Microphotonic Devices Based on Silicon Microfabrication Technology. *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. *The 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. and Haus, H.A. (2005) Three-Dimensional Analysis of Scattering Losses Due to Sidewall Roughness in Microphotonic Waveguides. *Journal of Lightwave Technology*, **23**, 2719-2732. <https://doi.org/10.1109/JLT.2005.850816>
- [10] Poulton, C.G., Koos, C., Fujii, M., 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., et al. (2020) Investigation for Sidewall Roughness Caused Optical Scattering Loss of Silicon-on-Insulator Waveguides with Confocal Laser Scanning Microscopy. *Coatings*, **10**, Article 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**, 2593-2600. <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., et al. (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., et al. (2007) Demonstration for Rearrangeable Nonblocking  $8 \times 8$  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,  $2 \times 2$  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., et al. (2018) Recent Advances in Optical Technologies for Data Centers: A Review. *Optica*, **5**, 1354-1370. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.001354>