

# Research on the Fabrication and Performance of Silicon-Based Mach-Zehnder Interferometers

Yixiao Hong<sup>1</sup>, Jianxun Hong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Hubei Province Shuiguohu High School, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

Email: [jxhong@whut.edu.cn](mailto:jxhong@whut.edu.cn)

Received: Feb. 3<sup>rd</sup>, 2018; accepted: Feb. 19<sup>th</sup>, 2018; published: Feb. 26<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The silicon based integrated waveguide is an important platform of the electrooptic integration. Because of the good performances, silicon based integrated Mach-Zehnder interferometers have become important forms of integrated optical filters, optical switches, optical modulators and waveguide sensors. In this paper, the design, fabrication and performance of the integrated Mach-Zehnder interferometer were researched. The coupling efficiency of the waveguide grating coupler was optimized by simulation. The device was fabricated by using electron lithography and ion etching technologies. Results show that an excellent device has been obtained with an end-to-end transmission loss better than -10 dB, an extinction ratio larger than 32 dB, and a free spectrum rang of 2.275 nm.

## Keywords

Silicon Based Waveguide, Interferometer, Waveguide Grating Coupler, Optical Spectrum

---

# 硅基集成Mach-Zehnder干涉仪的制备与性能研究

洪忆霄<sup>1</sup>, 洪建勋<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>湖北省水果湖高级中学, 湖北 武汉

<sup>2</sup>武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉

Email: [jxhong@whut.edu.cn](mailto:jxhong@whut.edu.cn)

---

\*通讯作者。

收稿日期: 2018年2月3日; 录用日期: 2018年2月19日; 发布日期: 2018年2月26日

## 摘要

硅基集成波导是光电子集成的一个重要平台, 硅基集成Mach-Zehnder干涉仪是光滤波器、光开关、光调制器和波导传感器的一种重要形式。本文对硅基集成Mach-Zehnder干涉仪的设计、制备和性能测量进行了研究, 通过仿真计算优化了波导耦合光栅的耦合效率, 采用电子束直写技术和离子刻蚀技术实现了波导的高精度制备。测试结果显示器件的性能优良, 端对端的传输损耗优于-10 dB, 干涉仪的干涉输出对比度达到了32 dB, 自由频谱范围为2.275 nm。

## 关键词

硅基波导, 干涉仪, 波导光栅耦合器, 光谱

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

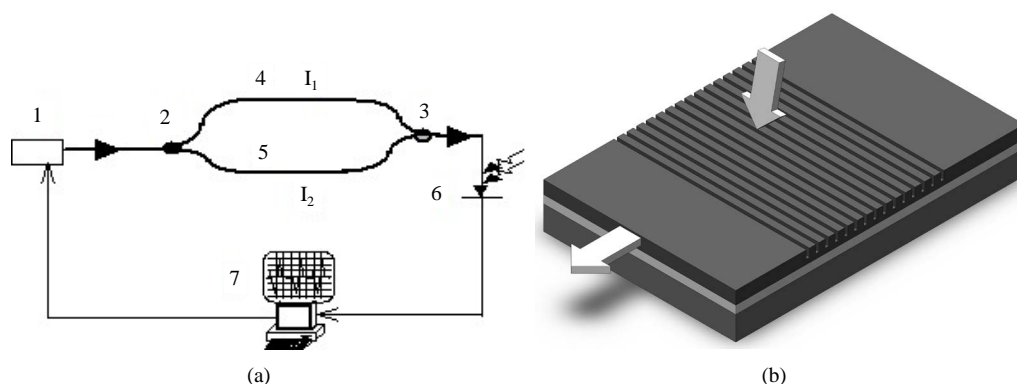
硅基集成技术在微电子领域得到了深入而广泛的应用, 工艺流程与设备已经非常成熟, 随着光电子技术的发展, 人们提出了将硅基集成技术与光电子技术相结合的思想, 采用集成技术可以将光电子功能器件制备在硅基衬底之上, 还可以与微电子功能电路集成到一起, 获得性能稳定, 功能丰富的硅基光电子集成电路。由于硅材料具有很高折射率和良好的透光性能, 所以可以在将硅基衬底上实现性能优异的纳米量级的光波导器件[1] [2] [3]。

集成光波导器件包括滤波器、调制器和光开关等, 通过这些器件的组合应用可以实现光通信系统中的光交换、光调制和光信号处理功能[4] [5]。光波导的实现形式有多种, Mach-Zehnder干涉仪是一种重要的波导形式, 具有形式灵活、工艺实现容易、灵敏度高、优良特性, 使用它可以实现光滤波器、光开关和光调制器。从光学功能上分析, Mach-Zehnder干涉仪可以工作在推拉模式, 在进行光调谐时不存在相位调制, 不会导致光学啁啾, 调制速度也不会像光学环形腔器件那样受光子寿命的制约, 因此Mach-Zehnder干涉仪是实现快速调谐和高速调制的极佳选择。

除了在光通信领域的应用之外, 光波导Mach-Zehnder干涉仪在集成生物与化学传感器领域也有着广泛的应用, 不仅可以采用波长和强度检测, 还可以采用更先进的信号检测方法, 比如差分检测、相位载波检测等。本文将对硅基集成Mach-Zehnder干涉仪的设计、制备和性能测试进行研究。优化设计, 采用硅基工艺在SOI基片上制备器件, 对器件性能进行测量。

## 2. 理论分析与设计

集成波导型Mach-Zehnder干涉仪由两个3 dB耦合器和两个干涉臂组成, 原理图如图1(a)所示, 图中1为激光器, 2和3为3 dB耦合器, 4和5为干涉臂, 6为探测器, 7为系统控制与数据记录用计算机。激光通过偏振态调整之后, 输入到第一个3 dB耦合器, 经过两个干涉臂传输, 在第二个3 dB耦合器的输出端干涉。干涉输出光强可表示为



**Figure 1.** (a) Schematic illustrator of the Mach-Zehnder interferometer; (b) Schematic illustrator of silicon grating coupler

**图 1.** (a) Mach-Zehnder 干涉仪原理图; (b) 波导光栅耦合器的结构示意图

$$I = \frac{1}{2}(I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi), \tag{1}$$

其中,  $I_1$  和  $I_2$  为第一个和第二个干涉臂中的光强;  $\phi$  为两干涉臂之间的相位差。由上式可知,  $\sqrt{I_1 I_2}$  可表示为

$$\sqrt{I_1 I_2} = \frac{1}{2}(I_{\max} - I_{\min}), \tag{2}$$

其中,  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  分别为干涉输出的最大和最小光强。

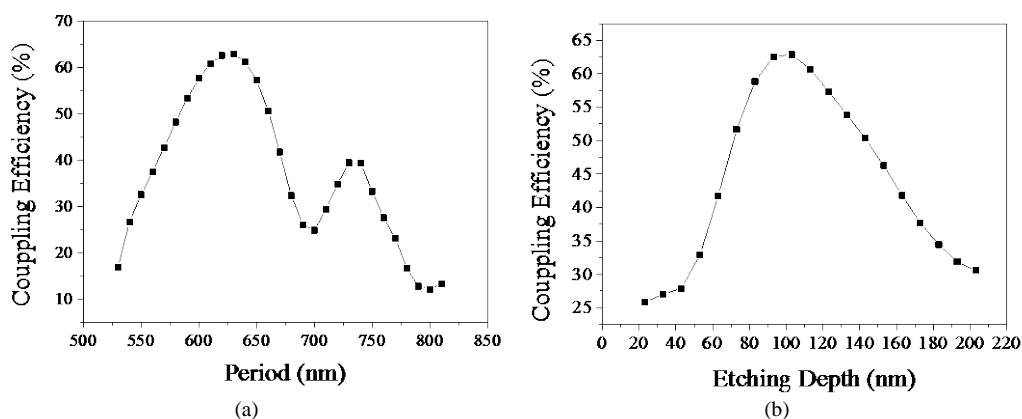
若一个角频率为  $\omega$  的调制信号施加在其中的一个干涉臂上并使得干涉臂中的相位被调制, 干涉输出将会发生改变。假设产生的相移变化为  $\Delta\phi$ , 当调制度较小时, 根据(1)式调制光强可以表达为

$$I_m = I_{m0} \sin \omega t = -\sqrt{I_1 I_2} \sin \phi \times \Delta\phi, \tag{3}$$

其中,  $I_{m0}$  为调制光强幅度。可以看出, 输出光强度幅度与相移变化  $\Delta\phi$  成正比, 为了使得  $I_{m0}$  最大, 通常将干涉仪设置在正交偏置, 即将  $\phi$  设置为  $\pi/2$ , 在实际应用中, 可以通过设置两个干涉臂之间的长度差来实现正交偏置。

本文采用光栅耦合器实现光的耦合[6] [7] [8], 在器件的输入输出位置分别制备耦合光栅, 通过在光栅上方垂直放置光纤即可实现光的耦合, 无需对基片进行切割。波导光栅耦合器为在波导上制备的一组一定周期的条形硅, 光栅耦合器的尺寸通常在十几个微米量级, 因此可以大幅提高基片上波导器件的集成度。光栅耦合器可以制作在基片上的任何位置, 所以可以在任何需要测试的位置进行光的耦合, 从而提供了一种灵活的片上测试技术。光栅耦合器的结构如图 1(b)所示, 硅和二氧化硅的折射率分别为 3.45 和 1.45, 波长  $\lambda$  为 1550 nm。

基于光路可逆原理, 输入和输出光栅耦合器是完全一样的, 因此为简单起见, 本文只计算光从波导经光栅耦合器耦合到光纤中的效率, 通过仿真优化光栅耦合器的参数。采用时域有限差分法计算不同光栅周期和光栅刻蚀深度时的耦合效率, 首先计算波导的基模, 然后将其作为输入光, 计算波导光栅耦合器中的光场强度分布, 最后在光栅上方做重叠积分得到耦合光强度。仿真结果如图 2 所示, 可以看出, 当光栅周期为 630 nm, 光栅刻蚀深度为 100 nm 时, 耦合效率最大, 达到了 62.8%。图 2(a)中在周期为 735 nm 处出现了第二个峰值, 耦合效率约为 40%, 这一峰值来源于波导衬底埋入层的反射, 光在埋入层中的来回反射导致谐振增强, 使得在该处产生了一个较弱的峰值。



**Figure 2.** Coupling efficiencies of grating couplers (a) with different period; (b) with different etching depth

**图 2.** (a) 耦合效率与光栅周期的关系; (b) 耦合效率与光栅刻蚀深度的关系

### 3. 器件制备

选用 SOI 基片来制备器件, SOI 基片的二氧化硅埋入层厚度为 5  $\mu\text{m}$ , 顶层硅厚度为 200 nm。器件制备工艺过程如下: 首先在清洁后的 SOI 基片上氧化生成 100 nm 的二氧化硅作为后续硅刻蚀工艺中的掩膜层; 采用电子束直写技术在电子束光刻胶上描写出波导图案; 采用反应离子刻蚀技术(RIE)在二氧化硅掩膜层上刻蚀出波导图案作为掩膜版, 去除光刻胶; 采用感应耦合等离子体技术(ICP)刻蚀硅层, 形成直波导部分; 重复上面的工艺, 并进行掩膜对准, 制作出耦合光栅部分, 完成整个器件的制备。根据仿真结果并结合实验优化情况, 光栅周期取为 630 nm, 光栅刻蚀深度取为 100 nm, 光栅刻槽宽度取为 350 nm。

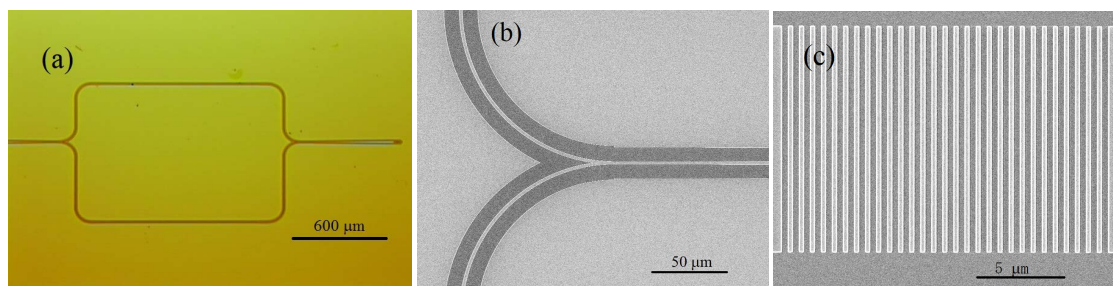
器件的显微图如图 3 所示, 图 3(a)为干涉仪的光学显微图片, 图 3(b)为干涉仪的 Y 型耦合区的 SEM 显微图, 图 3(c)为干涉仪的光栅耦合器的 SEM 图, 结果显示制作是成功的, 实现了设计的波导参数, 干涉仪两臂之间的长度差  $\Delta L$  为 400  $\mu\text{m}$ 。

### 4. 干涉仪的光谱测量

通过搭建的垂直耦合光路测试系统, 对系统进行测量, 两根耦合光纤以与垂直方向成  $8^\circ$  角的形式置于耦合光栅的上方, 输入光纤为保偏光纤, 输出光纤为普通光纤, 光纤端面通过光纤切割刀进行切割, 良好的端面有利于提高耦合效果。通过旋转保偏光纤的角度实现 TE 模式输入, 调节微调平台移动光纤实现最佳光耦合, 光栅表面与光纤端面之间的距离通常在 50  $\mu\text{m}$  左右。波长可调激光器的光输入到保偏光纤中, 输出光纤的光连接到探测器, 通过实验室自己开发的 Labview 程序控制激光器与探测器, 实现波长扫描和光功率记录, 波长扫描范围为 40 nm, 扫描间隔为 1 pm。测量所得光谱如图 4 所示。可以看出干涉仪干涉输出对比度达到了 32 dB, 自由频谱范围(FSR-Free Spectrum Rang)为 2.275 nm。器件端到端的传输损耗为 -10 dB, 实现了低损耗传输。FSR 可以表示为  $FSR = \lambda^2 / (N_{\text{eff}} \Delta L)$  [9], 根据此公式可以估算出有效折射率  $N_{\text{eff}}$  为 2.6114。图 4 中显示的光谱具有很好的滤波特性, 因此该 Mach-Zehnder 干涉仪可以作为滤波器使用, 用于波长控制和光谱分析处理。如果对硅材料进行掺杂, 则可以实现对折射率的调谐, 这样便可以得到可调谐滤波器或光调制器, 作为调制器工作时, 通常将工作点设置在图中极大值与极小值之间的中点, 获得最佳调制。

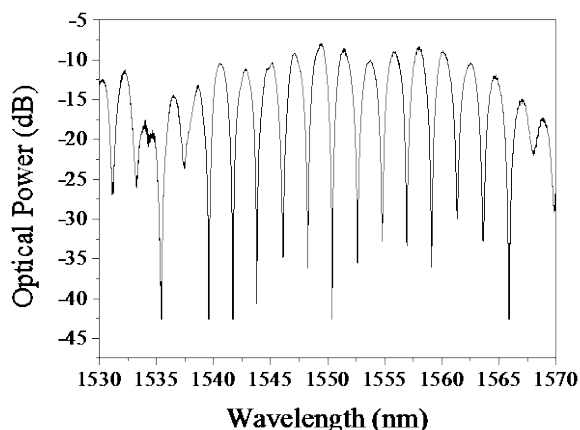
### 5. 总结

本文对硅基集成 Mach-Zehnder 干涉仪进行了研究, 干涉仪在 SOI 基片上制备, 采用波导光栅耦合器



**Figure 3.** Micrograph of the Mach-Zehnder interferometer

**图 3.** Mach-Zehnder 干涉仪显微图



**Figure 4.** Optical spectrum of the Mach-Zehnder interferometer

**图 4.** Mach-Zehnder 干涉仪的光谱图

实现光的输入和输出。采用时域有限差分法对耦合光栅进行了设计和优化, 获得了 62.8% 的耦合效率, 采用电子束刻写和离子刻蚀技术制备波导, 实现方便快捷的波导图案直写和高精度制备。SEM 检测和光谱测量显示, 本文的设计方法和制备工艺实现了性能优异的硅基集成 Mach-Zehnder 干涉仪, 干涉仪的干涉输出对比度达到了 32 dB, 自由频谱范围为 2.275 nm。

## 基金项目

教育部留学回国人员科研启动基金(2013-693)资助项目。

## 参考文献 (References)

- [1] Li, Y., Stewart, L.S. and Dapkus, P.D. (2012) High Speed Silicon Microring Modulator Employing Dynamic Intracavity Energy Balance. *Optics Express*, **20**, 7404-7414. <https://doi.org/10.1364/OE.20.007404>
- [2] Mekis, A., Gloeckner, S., Masini, G., et al. (2011) A Grating-Coupler-Enabled CMOS Photonics Platform. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **17**, 597-608. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2010.2086049>
- [3] Malacarne, A., Gambini, F., Faralli, S., et al. (2014) High-Speed Silicon Electro-Optic Microring Modulator for Optical Interconnects. *IEEE Photonics Technology Letters*, **26**, 1042-1044. <https://doi.org/10.1109/LPT.2014.2313040>
- [4] 洪建勋, 刘莹, 陈伟. 硅基槽型微环谐振器及其调谐特性研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(9): 1668-1672.
- [5] Hong, J., Qiu, F., Cheng, X., et al. (2017) A High-Speed Electro-Optic Triple-Microring Resonator Modulator. *Scientific Reports*, **7**, 4682. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04851-x>
- [6] Zhou, L., Li, Z.-Y., Zhu, Y., et al. (2010) A Novel Highly Efficient Grating Coupler with Large Filling Factor Used for Optoelectronic Integration. *Chinese Physics B*, **19**, 124214. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/19/12/124214>

- 
- [7] Mekis, A., Gloeckner, S., Masini, G., *et al.* (2011) A Grating-Coupler-Enabled CMOS Photonics Platform. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **17**, 597-608. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2010.2086049>
- [8] Zhang, C., Sun, J.-H., Xiao, X., *et al.* (2013) High Efficiency Grating Coupler for Coupling between Single-Mode Fiber and SOI Waveguides. *Chinese Physics Letters*, **30**, 14207. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/30/1/014207>
- [9] 刘莹. 微环谐振调制器的调制性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [app@hanspub.org](mailto:app@hanspub.org)