

# 1.55 $\mu\text{m}$ 波长硅基均匀光栅耦合器的设计与优化

高润中, 郭丽君\*, 崔健, 齐小瑜

长春理工大学, 吉林 长春

收稿日期: 2021年12月10日; 录用日期: 2022年1月6日; 发布日期: 2022年1月17日

## 摘要

为解决光波导器件耦合效率低、难以实现的问题, 本文开展了集成光波导耦合技术的研究, 设计了一种均匀光栅耦合器, 采用时域有限差分法对光栅耦合器进行了仿真和优化。计算结果: 光栅耦合器在耦合角度 =  $20^\circ$ , 刻蚀宽度  $w = 300 \text{ nm}$ , 刻蚀深度  $e = 70 \text{ nm}$ , 周期  $p = 660 \text{ nm}$  时, 该种光栅耦合器耦合效率达到 57.2%。本文工作可为光栅耦合器的设计提供参考。

## 关键词

光波导, 光栅耦合器, 时域有限差分法, 耦合效率

# Design and Optimization of Silicon Based Uniform Grating Coupler with 1.55 $\mu\text{m}$ Wavelength

Runzhong Gao, Lijun Guo\*, Jian Cui, Xiaoyu Qi

Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Dec. 10<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jan. 6<sup>th</sup>, 2022; published: Jan. 17<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In order to solve the problem of low coupling efficiency and difficult realization of optical waveguide devices, we carried out the research of integrated optical waveguide coupling technology in this paper, designed a uniform grating coupler, simulated and optimized the grating coupler using finite difference time domain method. Calculation result: when the coupling angle =  $20^\circ$ , the etching width  $w = 300 \text{ nm}$ , the etching depth  $e = 70 \text{ nm}$ , and the period  $p = 660 \text{ nm}$ , the coupling efficiency of the grating coupler reaches 57.2%. The work of this paper can provide reference for the design of grating coupler.

\*通讯作者。

## Keywords

Optical Waveguide, Grating Coupler, Finite Difference Time Domain Method, Coupling Efficiency

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

近年来, 硅基光子器件取得了飞速进展。与传统电子设备相比, 它在信号噪声、带宽、延迟等方面取得了很大的突破[1] [2] [3] [4]。因为其采用光子对信号进行传输, 所以在速度上光子要远大于电子; 在能量的传输中, 光传输信号的原理是波的阻抗变换, 能量的小尺寸低, 不会容易失真, 可以获得较大的传输容量。除了这些之外, 硅基光子器件还可以与金属氧化物半导体工艺兼容, 其制备相对简单, 性能优异[5] [6] [7] [8]。

硅基光子集成芯片的关键核心点是光信号的输入和输出[9] [10]。输入光要通过耦合器件进入光子芯片, 这个过程要引入独立的光源作为输入信号, 硅基光子芯片需要具备高效率、大带宽的光耦合结构。本文设计了一种基于 SOI (Silicon-on-Insulator) 结构和中心波长为 1550 nm 的光栅耦合器, 对其结构参数 (刻蚀宽度  $w$ 、刻蚀深度  $e$ 、周期  $p$ ) 进行了仿真和优化, 使其最优耦合效率达到 57.2%。由于半导体工艺的不断进步与完善, 光栅耦合器的精度也将会在不久的将来达到一个更高的程度, 会在通信、成像、探测等领域里得到更广泛的应用。

## 2. 光栅耦合器结构仿真与优化

光栅耦合器的结构如图 1 所示, 我们选取的是较为常规的 220 nm SOI 片, 顶部的硅层厚度为 220 nm, 衬底层的厚度为 2  $\mu\text{m}$ , 仿真结构如图 2 所示。光栅耦合器的结构参数主要包括周期  $p$ 、刻蚀深度  $e$ 、刻蚀宽度  $w$  和耦合角度  $\theta$ 。

影响一个普通的均匀光栅耦合器最大的是其耦合效率  $\delta$  和反射率  $R$ , 决定耦合效率好坏的三个结构参数为: 周期  $p$ , 刻蚀深度  $e$ , 刻蚀宽度  $w$ 。

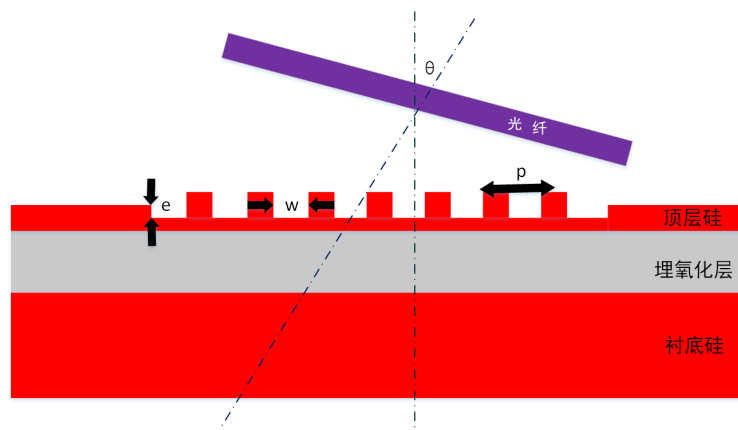
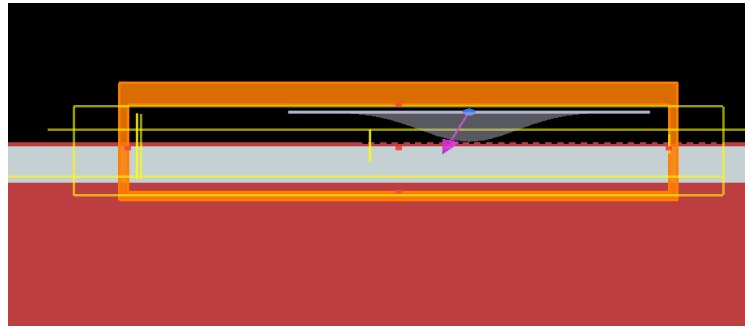


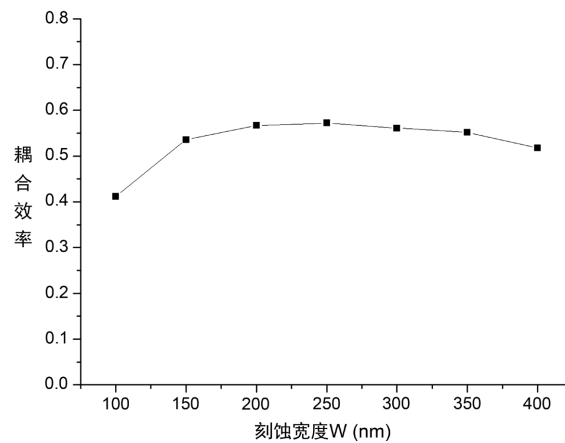
Figure 1. Schematic diagram of grating coupler structure

图 1. 光栅耦合器结构示意图

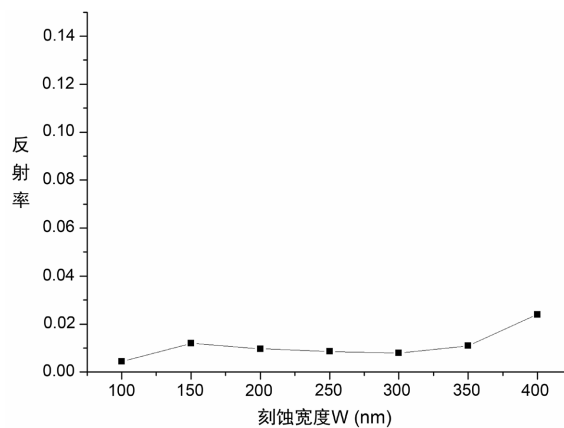


**Figure 2.** Grating coupler simulation structure diagram  
**图 2.** 光栅耦合器仿真结构图

我们首先对刻蚀宽度  $w$  对耦合效率的影响进行分析，耦合角度  $\theta = 20^\circ$ ，固定光栅耦合器的周期为  $p = 620 \text{ nm}$ ，刻蚀深度  $e = 70 \text{ nm}$ ，分别计算不同的刻蚀深度在  $1550 \text{ nm}$  波段的耦合效率，结果如图 3 所示。从图中我们可以看出刻蚀宽度  $w$  对耦合效率的影响较小，在  $w = 200 \sim 300 \text{ nm}$  范围内，耦合效率几乎不变。刻蚀宽度对反射率  $R$  的影响如图 4 所示，我们可以发现刻蚀宽度  $w$  的变化对反射率  $R$  的影响同样很小，在  $w = 100 \sim 400 \text{ nm}$  的区间，反射率  $R$  保持在 3% 以下。



**Figure 3.** Variation curve of coupling efficiency with etching width  $w$   
**图 3.** 耦合效率随刻蚀宽度  $w$  的变化曲线



**Figure 4.** Variation curve of reflectivity with etching width  $w$   
**图 4.** 反射率随刻蚀宽度  $w$  的变化曲线

同时,我们分析了刻蚀深度  $e$  对耦合效率的影响,耦合角  $\theta = 20^\circ$ ,将光栅耦合器的周期  $p$  固定在  $620 \text{ nm}$ ,刻蚀宽度  $w = 320 \text{ nm}$ ,并分别计算了不同刻蚀深度  $e$  对耦合效率的影响,结果如图 5 所示。从图中可以看出,刻蚀深度  $e$  对耦合效率有很大影响。当刻蚀深度  $e = 70 \text{ nm}$  时,耦合效率最大。刻蚀深度过大或过小都会降低耦合效率,但刻蚀深度过大会增加光栅耦合器的反射率  $R$ 。图 6 为在此结构下不同刻蚀深度  $e$  对应的反射率  $R$ ,我们可以看出反射率随刻蚀深度的不断增加和增大,在刻蚀深度  $e$  达到  $120 \text{ nm}$  时,反射率对应达到  $40\%$ ,这显然会导致耦合效率的降低。

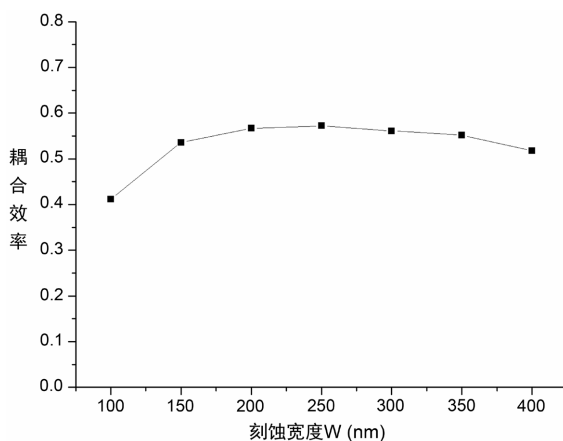


Figure 5. Variation curve of coupling efficiency with etching depth  $e$   
图 5. 耦合效率随刻蚀深度  $e$  的变化曲线

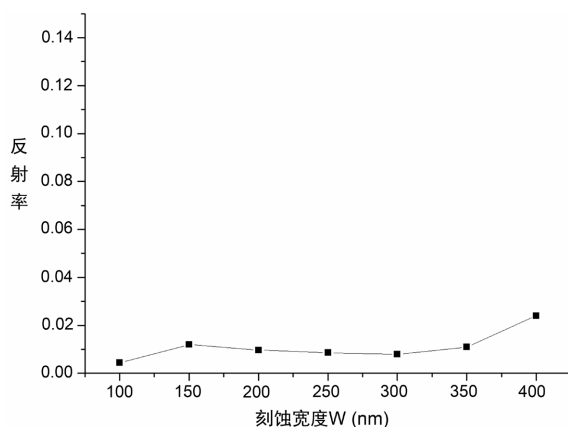
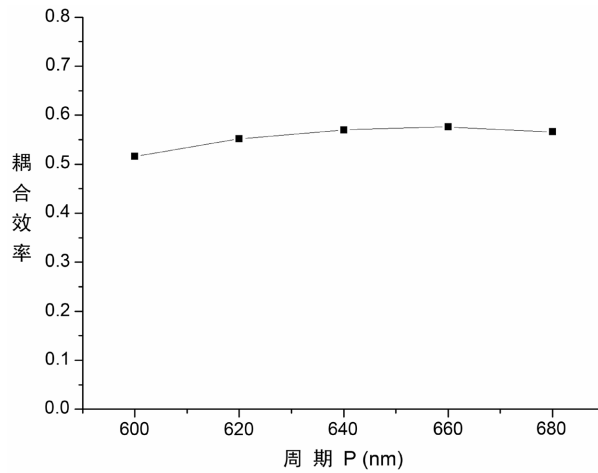


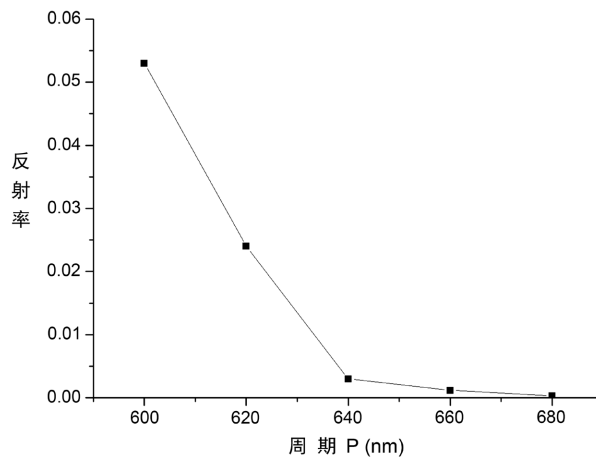
Figure 6. Variation curve of coupling efficiency with etching depth  $e$   
图 6. 反射率随刻蚀深度  $e$  的变化曲线

下面我们分析周期  $p$  对耦合效率的影响,耦合角度  $\theta = 20^\circ$ ,将光栅耦合器的刻蚀深度  $e$  固定为  $70 \text{ nm}$ ,刻蚀宽度  $w = 250 \text{ nm}$ ,结果如图 7 所示。从图中结果我们可以看出,当周期在  $p = 600 \sim 680 \text{ nm}$  之间时,耦合效率的变化较小,从图 8 可以看出光栅耦合器反射率变化同样不大。

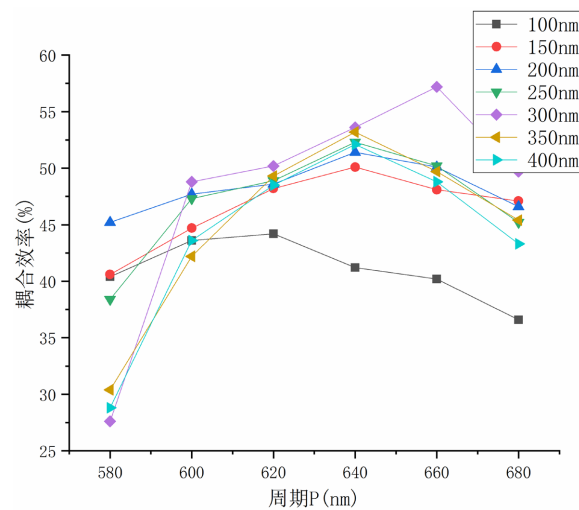
上面的仿真中,我们只是分析了单个结构参数对于光栅耦合器耦合效率的影响,为了获取较好的耦合效率,我们还需要对这三个参数进行综合的优化。由于从图 5 中我们可以得出当刻蚀深度  $e = 70 \text{ nm}$  时耦合效率最高,下面我们就分析耦合角度  $\theta = 20^\circ$ ,刻蚀深度  $e = 70 \text{ nm}$  时不同的刻蚀宽度  $w$  和周期  $p$  在  $1550 \text{ nm}$  波段下的耦合效率,结果如图 9 所示。从图中的数据我们可以明显看出当刻蚀宽度  $w = 300 \text{ nm}$ ,周期  $p = 660 \text{ nm}$  时,光栅耦合器耦合效率达到最大值,为  $57.2\%$ 。



**Figure 7.** Variation curve coupling efficiency with period p  
**图 7.** 耦合效率随周期 p 的变化曲线



**Figure 8.** Variation curve of reflectance with period p  
**图 8.** 反射率随周期 p 的变化曲线



**Figure 9.** The relationship curve of coupling efficiency with period p under different etching width w  
**图 9.** 不同刻蚀宽度 w 下耦合效率随周期 p 变化的关系曲线

### 3. 结论

我们仿真了均匀光栅耦合器并同属数据优化了其耦合效率。通过数据可知, 光栅的刻蚀深度  $e$  对耦合效率有着明显的影响, 如要加工, 需要对其工艺参数进行合理的选择, 并且过程中要控制的精细。最后通过多组数据的分析我们得出在在耦合角度  $\theta = 20^\circ$ , 刻蚀宽度  $w = 300 \text{ nm}$ , 刻蚀深度  $e = 70 \text{ nm}$ , 周期  $p = 660 \text{ nm}$  时, 光栅耦合器耦合效率达到最大值, 为 57.2%。

### 参考文献

- [1] 余金中. 硅光子学的研究和发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(12): 68-71.
- [2] 周治平, 王兴军, 冯俊波, 等. 硅基微纳光电子系统中光源的研究现状及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(10): 28-35.
- [3] 杨健, 陈伟伟, 王皖君, 等. 基于载流子注入的 SOI  $4 \times 4$  MMI-MZ 光开关阵列[J]. 光电子·激光, 2013, 24(1): 16-20.
- [4] Han, H.P. and Xiang, B.X. (2020) Grating Coupler Design for Vertical Light Coupling in Silicon Thin Films on Lithium Niobate. *Crystals*, **10**, 850. <https://doi.org/10.3390/cryst10090850>
- [5] 李玲玲, 恽斌峰, 胡国华, 等. 高品质因子聚合物可重构微环谐振腔滤波器[J]. 光电子·激光, 2015, 26(4): 682-687.
- [6] Li, H., Liu, Y., Zhang, M., *et al.* (2014) Highly Efficient Polarization Independent Grating Coupler Used in Silica-Based Hybrid Photodetector Integration. *Optical Engineering*, **53**, 057105. <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.5.057105>
- [7] Cheng, L.R., Mao, S.M., Li, Z., Tu, X. and Fu, H.Y.(2021) High-Efficiency Dual-Band-Multiplexing Three-Port Grating Coupler on 220-nm Silicon-on-Insulator with 248-nm Deep-UV Lithography. *Optics Letters*, **46**, 3308-3311. <https://doi.org/10.1364/OL.430807>
- [8] Can, Z., Jing-Hua, S., Xi, X., *et al.* (2013) High Efficiency Grating Coupler for Coupling between Single-Mode Fiber and SOI Waveguides. *Chinese Physics Letters*, **30**, 0142047. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/30/1/014207>
- [9] 周唯. 硅基波导光栅耦合器件的研究[D]: [硕士学位论文]. 湖南: 中国人民解放军国防科技大学, 2011: 6-9.
- [10] Cheng, L.R., *et al.* (2020) Grating Couplers on Silicon Photonics: Design Principles, Emerging Trends and Practical Issues. *Micromachines*, **11**, 666. <https://doi.org/10.3390/mi11070666>