

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0083-03

# 基于绝缘体上硅和溶胶-凝胶杂化 SiO<sub>2</sub> 模斑转换器的研究

尹小杰 吴远大 王 玥 张家顺 李建光 胡雄伟

(中国科学院半导体研究所光电子研发中心, 北京 100083)

**摘要** 为了提高基于绝缘体上硅(Silicon on insulator, SOI)的 Si 微纳波导器件和光纤的耦合效率,设计了一种基于 SOI 和溶胶-凝胶杂化 SiO<sub>2</sub> 材料的新型微纳倒锥波导模斑转换器。此模斑转换器由 Si 微纳倒锥波导和溶胶-凝胶杂化 SiO<sub>2</sub> 矩形波导组成。使用三维束传播法(3D-BPM)对器件结构进行模拟优化。在倒锥波导模斑转换器的连接下,波长 1550 nm,近似 TE 模的光源下的模拟结果显示:单模光纤和 SOI 的 Si 微纳波导的耦合效率达到了 95%(损耗低于 0.22 dB),结果可以有效地满足微纳波导器件和光纤的低损耗耦合的需要。

**关键词** 光学器件;模斑转换器;溶胶-凝胶;微纳波导;三维束传播法

中图分类号 TN252 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0083

## Study of Spot-Size Converter Based on Silicon-on-Insulator and Hybrid Sol-Gel SiO<sub>2</sub>

Yin Xiaojie Wu Yuanda Wang Yue Zhang Jiashun Li Jianguang Hu Xiongwei

(Optoelectronics Research and Development Center, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** In order to improve the coupling efficiency between the single-mode fiber and the nano-silicon-wire waveguide in silicon-on-insulator (SOI), a novel tapered spot-size converter (SSC) is designed, which is constructed with a tapered silicon waveguide and an overlaid rectangular hybrid sol-gel SiO<sub>2</sub> waveguide. Simulation analysis, which is performed with the three-dimensional beam propagation method (3D-BPM) at  $\lambda = 1550$  nm with semi-TE polarization, shows that the coupling efficiency can be up to 95% (loss of 0.22 dB), which is very promising for high coupling efficiency between the single-mode fiber and the nano-silicon-wire waveguide.

**Key words** optical devices; spot-size converter; sol-gel; nano-silicon-wire waveguide; 3D-beam propagation method

### 1 引 言

随着对信息和通信需求的飞速发展,人们对光电子器件的集成提出了越来越高的要求。基于绝缘体上硅(SOI)材料的波导结构为光电子器件的高度集成提供了一个很好的平台。这种 SOI 结构的 Si 波导具有很高的折射率差( $\Delta n \sim 2$ ),因此可以使波导在 1550 nm 波长光下的单模尺寸降到  $300 \text{ nm} \times 300 \text{ nm}$ <sup>[1]</sup>,同时可以把波导的弯曲半径减小到微米

量级。这样小尺寸的波导结构使得光电子器件的集成度得到了很大的提高。近年来关于高集成的 SOI 光电子器件的报道也越来越多<sup>[1~5]</sup>。然而,器件尺寸减小,集成度得到提高的同时,也为波导和光纤的耦合带来了很大的困难。由于 SOI 结构的 Si 波导和光纤的截面模场尺寸差值很大,以及波导高的折射率差导致的端面反射损耗很大,这些都导致了波导和光纤之间的耦合损耗非常大,这已经成为阻碍

**基金项目:** 国家 863 计划(2007AA03Z420)和国家 973 计划(2007CB613404)资助课题。

**作者简介:** 尹小杰(1982 年—),男,博士研究生,主要从事 Si 基光波导和光通信器件等方面的研究。

E-mail: yinxiaojie@semi.ac.cn

**导师简介:** 胡雄伟(1945 年—),男,研究员,主要从事激光器和 Si 基光波导和光通信器件等方面的研究。

E-mail: hxw@semi.ac.cn

SOI 微纳波导器件应用的主要障碍之一。

倒锥波导模斑转换器(SSC)由于具有与微纳波导制作工艺相兼容和高的耦合效率而被广泛研究<sup>[1,4,6]</sup>。图1为倒锥波导 SSC 的工作原理示意图,其中左端光纤中的光信号经过左端 SSC 耦合进入微纳波导集成器件中,然后经过微纳波导集成器件的处理,再由右端的 SSC 耦合进入右端的光纤输出,完成光信号在微纳波导集成器件中的处理及传输。

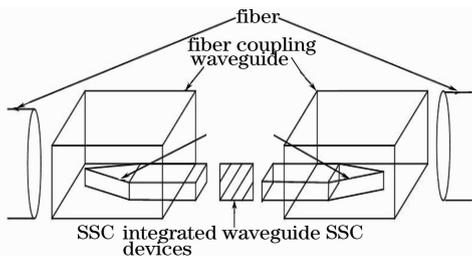


图1 倒锥波导 SSC 工作示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SSC in optical system

设计了一种新型倒锥波导 SSC,简化了倒锥波导 SSC 的制作工艺<sup>[1,4,7]</sup>,然后使用三维束传播法(3D-BPM)对设计的倒锥波导 SSC 的结构进行模拟优化。模拟优化结果显示,微纳倒锥波导 SSC 可以使光纤和微纳波导的耦合效率达到 95%(损耗低于 0.22 dB),有效地满足了微纳波导器件和光纤低损耗耦合的需要。

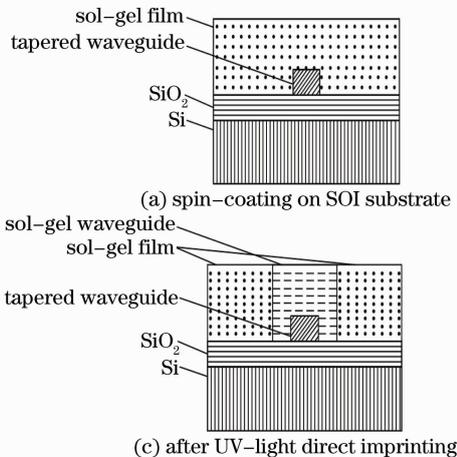


图3 溶胶-凝胶法制作光纤耦合波导过程示意图

Fig. 3 Fabrication process of fiber-coupling waveguides

## 2 倒锥波导 SSC 的设计

倒锥波导 SSC 由 Si 微纳倒锥波导和溶胶-凝胶杂化 SiO<sub>2</sub> 矩形光纤耦合波导两部分组成,如图2所示。此倒锥波导 SSC 采用紫外写入溶胶-凝胶<sup>[8]</sup>的方法来制作倒锥波导 SSC 中光纤耦合波导,大大简化了倒锥波导 SSC 的制作工艺。

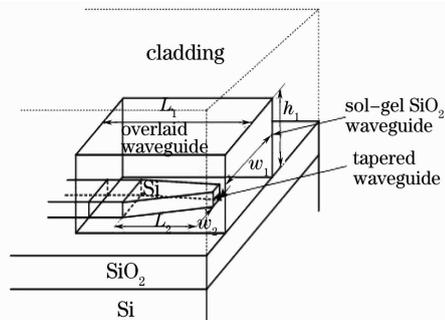


图2 倒锥波导 SSC 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tapered waveguide SSC

其制作工艺过程如下:首先在 SOI 的基片上,使用电子束光刻(EBL)和感应耦合等离子体(ICP)刻蚀工艺<sup>[1,2]</sup>制作出 Si 微纳集成波导器件及 Si 倒锥波导,然后采用紫外写入溶胶-凝胶法制作光纤耦合波导,完成倒锥波导 SSC 的制作。其中紫外写入溶胶-凝胶制作光纤耦合波导工艺<sup>[8]</sup>如图3所示。

## 3 模拟分析

采用 3D-BPM 对倒锥波导 SSC 进行模拟,基本原理即对光纤和波导中的光标量亥姆霍兹方程(1)式进行缓变包络近似获得 3D-BPM 的基本方程<sup>[9,10]</sup>为

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 z} + k(x, y, z)^2 \phi = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial^2 z} = \frac{j}{2k} \left[ \frac{\partial^2 E}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 E}{\partial^2 y} + (k^2 + \bar{k}^2) E \right]. \quad (2)$$

从此方程出发,只要给定输入场  $E(x, y, z)$ ,就可以递推确定所有的场分布情况。倒锥波导 SSC (如图2)的结构参数为:SOI 片子的 SiO<sub>2</sub> 隔离层折射率  $n_{\text{SiO}_2} = 1.44$ ,顶层 Si 波导折射率为 3.50,厚度

$h_2 = 310$  nm, 微纳波导宽度为 310 nm, 溶胶-凝胶杂化 SiO<sub>2</sub> 光纤耦合波导折射率为 1.50, 截面尺寸  $h_1 = \omega_1 = 3.5$   $\mu\text{m}$ , 上包层折射率  $n_{\text{SiO}_2} = 1.44$ 。使用

3D-BPM 对 Si 倒锥波导的长度  $L_2$ , 尖端宽度  $\omega_2$  进行优化模拟, 其模拟结果如图 4 所示。

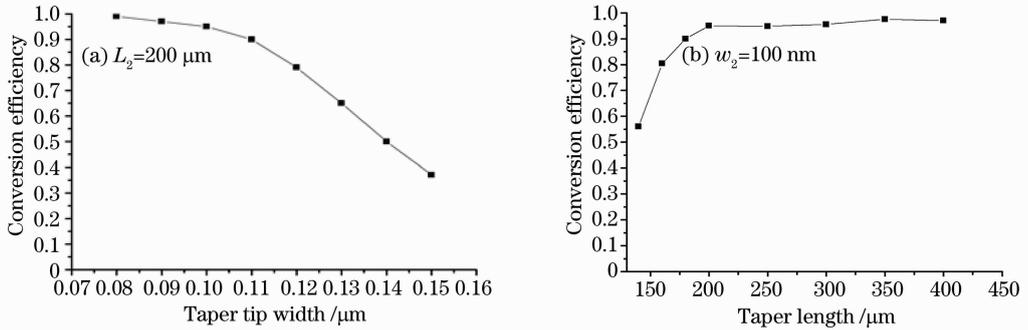


图 4 耦合效率和微纳倒锥波导参数的关系

Fig. 4 Calculated conversion efficiency dependence on parameters of tapered waveguide

从图 4(a)中可以发现, 当倒锥尖端尺寸  $\omega_2 < 0.1$   $\mu\text{m}$  时, 耦合效率变化很小, 当  $\omega_2 > 0.1$   $\mu\text{m}$  时, 耦合效率随着  $\omega_2$  的增加而降低。从图 4(b)中可以得到的, 当倒锥长度  $L_2 > 200$   $\mu\text{m}$  后, 耦合效率保持很小的变化。考虑到倒锥波导 SSC 的实际制作工艺容差要求<sup>[4,6]</sup>, 选择倒锥波导的参数为:  $\omega_2 = 0.1$   $\mu\text{m}$ ,  $L_2 = 200$   $\mu\text{m}$ 。1550 nm 下近似 TE 模入射光的 3D-BPM 模拟结果如图 5 所示, 光纤和倒锥波导 SSC 的耦合效率达到 95% (损耗低于 0.22 dB)。

参 考 文 献

- 1 K. Yamada, T. Tsuchizawa, T. Watanabe *et al.*. Silicon wire waveguiding system; fundamental characteristics and applications [J]. *Electronics and Communication in Japan, Part2*, 2006, **89**(3): 42~55
- 2 Liu Xu, Xiao Jinbiao, Sun Xiaohan. Alignment and coupling between planar lightwave circuit chip and wedge-shaped fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 680~684  
刘旭, 肖金标, 孙小茜. 楔形光纤与半导体多量子阱平面光波导光路芯片的耦合分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 680~684
- 3 Dong Zuoren, Xia Zhiping, Qin Shibo *et al.*. Analyses and experimental study of a  $N \times N$  optical switch using two-facet reflective mirrors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 234~238  
董作人, 夏志平, 秦世博等. 基于双面反射镜的  $N \times N$  光开关的特性分析和实验研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 234~238
- 4 H. Yoshida, T. Sato, K. Ohira *et al.*. A novel thin-overcladding spot-size converter for efficient silicon-wire optical interconnections and waveguide circuits[C]. *Group IV Photonics, 2008 5th IEEE International Conference*, 2008: 377~379
- 5 Xuejun Xu, Jinzhong Yu *et al.*. An investigation of the mode characteristics of SOI submicron rib waveguides using the film mode matching method[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2009, **11**(1): 015568
- 6 Vilson R. Almeida, R. Robert *et al.*. Nanotaper for compact mode conversion[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(15): 1302~1304
- 7 S. J. McNab, N. Moll, Y. A. Vlasov. Ultra-low loss photonic integrated circuit with membrane-type photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(22): 2927~2939
- 8 Wang Yue, Hu Xiongwei, Li Jianguang *et al.*. Realization of MMI power splitter by UV-light imprinting technique using hybrid Sol-Gel SiO<sub>2</sub> materials [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**: 3693~3695
- 9 M. D. Feit, J. A. Fleck. Light propagation in graded-index optical fibers[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(24): 3990~3998
- 10 R. Scarmozzino, A. Gopinath R. Pregla *et al.*. Numerical techniques for modeling guided-wave photonic devices[J]. *IEEE. J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(1): 150~162

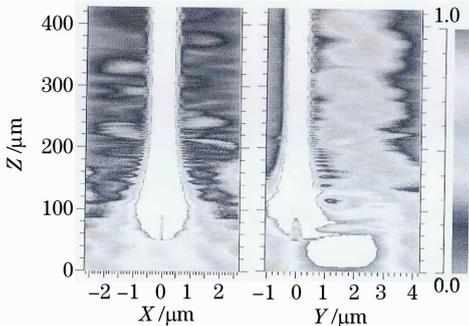


图 5 倒锥波导 SSC 的 3D-BPM 模拟图

Fig. 5 Simulation result of SSC using 3D-BPM

4 结 论

设计了一种新型的倒锥波导 SSC, 采用溶胶-凝胶杂化 SiO<sub>2</sub> 光纤耦合波导的制作工艺, 简化了器件的制作工艺。采用 3D-BPM 的方法对设计的结构进行模拟优化, 获得了 95% 的高耦合效率。为制作基于 SOI 的高耦合效率的倒锥波导 SSC 提供了一个有效的参考方法。