

Si 基微纳集成光波导的理论设计*

陈志文 李章健 朱启乐 赵玉周 林旭彬 李 静 蔡志岗 王 钢 李宝军

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

摘要: 提出了一种宽度从微米到亚微米、深亚微米、再到纳米级渐变的微纳集成结构光波导, 并通过理论分析和模拟计算得到了基于 Si 基半导体材料的微纳集成光波导参数. 其制作工艺非常简单, 插入损耗在 1~2.5dB 之间. 这种微纳集成光波导不但可解决芯径为 $10\mu\text{m}$ 的单模光纤与纳米量级的光子晶体波导器件间的光对接、耦合和互连等难题, 还可缩小光波导器件芯片的单元尺寸, 有利于提高器件的集成度. 为光电子器件向纳米光子集成方向的发展提供了新途径, 为新一代全光通信用微纳新原理光电子器件及功能集成的发展提供了新思路.

关键词: 微纳集成; 光波导; 集成光学; 集成光子学

PACC: 4280L; 4282

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)S0-0229-04

1 引言

光通信用光电子器件尺寸的不断缩小和集成度的进一步提高是 21 世纪光科学和技术发展的重要方向之一, 也是提高光电子器件性能价格比最有效的途径之一. 目前, 光电子器件的尺寸正从微米向亚微米甚至向纳米级迅猛发展, 这给新型纳米级光电子器件在光纤通信系统中的应用带来了挑战. 其主要原因是以微米级光波导为基础的光通信用光器件尺寸的进一步缩小, 意味着光波导器件与光通信系统中单模光纤之间的耦合失配和损耗将增大, 从而成为限制光通信用光电子器件向微型化和高度集成化发展的“瓶颈”, 是 21 世纪急需解决的关键问题. 要突破此“瓶颈”的限制: 一是直接发展纳米光子器件和纳米集成, 但以纳米光子晶体为主的光器件在光通信系统中难以实现直接与芯径为 $10\mu\text{m}$ 的单模光纤之间的对接和耦合; 二是走微米和纳米(即微纳)集成的道路, 发展微纳结构的光电功能集成技术和器件研制. 走微纳集成的道路, 一方面, 通过微米到亚微米甚至到深亚微米光波导的中介作用, 易于实现单模光纤与光子晶体器件间的光对接、耦合和互连, 另一方面, 用纳米级光波导可缩小器件芯片的

单元尺寸, 从而有利于提高集成度. 因此, 一种经济可行、易于见效的思路和途径是结合纳米技术, 进行微纳集成光波导的研究.

目前, 与微纳集成的光波导研究大都是集中在采用锥形结构的光纤波导^[1~3]、一端带有棱镜或透镜的光纤波导^[4]等, 特别是 2003 年 Chang 等人^[5]所报道的在光纤波导的一端设计有一个由凸透镜和凹透镜组成的望远镜式结构光纤波导的研究是向微纳集成迈进的一大步, 也给本文的工作带来了很大的启迪. 但这种望远镜式结构的微纳集成光波导给器件的制作提出了高难度的要求, 即两个透镜的形状和位置必须严格按照设计要求制作. 为了避免 Chang 等人的望远镜式结构光波导在制作中对两个透镜形状要求非常严格的难题, 本文提出并设计了一种宽度从微米到亚微米、深亚微米、再到纳米级渐变的微纳集成光波导, 并对其进行了理论分析和模拟设计.

2 器件结构

图 1 是所提出的微纳集成光波导结构示意图. 它是由微米级波导(I), 微米、亚微米、到深亚微米渐变波导(II)和纳米级波导(III)三部分组成. 为了

* 教育部科学技术研究基金(批准号:104144), 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20040558009)和广东省科技计划重大专项基金(批准号:2003A1060201)资助项目

在光纤通信系统中易于实现直接与芯径为 $10\mu\text{m}$ 的单模光纤之间的光对接和光耦合,微米级单模波导 I 的宽度取为 $10\mu\text{m}$;同时为了易于实现与纳米量级的光子晶体器件间的光对接、耦合和互连,纳米级波导 III 的宽度选取 $1\mu\text{m}$, 800nm 和 500nm 三种尺寸为例.其中波导 I 和 III 之间的波导 II 是一种尺寸渐变的结构,是所提出的微纳集成光波导结构设计重点.

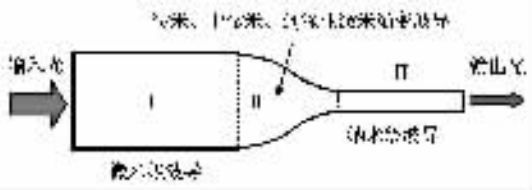


图 1 微纳集成光波导结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of a micro- and nano-integrated optical waveguide structure

3 模拟设计与结果

通过解 Maxwell 方程的方法利用二维光束传播法(2D-BPM)对所设计的微纳集成光波导进行了模拟分析,模拟用波导材料是折射率为 3.48 的轻掺杂 Si,衬底采用重掺杂 Si,包层是空气(折射率为 1),选用的波长是光纤通信系统中用的 $1.55\mu\text{m}$ 波长.为了得到优化的微纳集成光波导并与锥形结构的光波导比较, I 和 III 之间的波导 II 轮廓弧线采用指数函数形式表达,其基本关系式为:

$$y = \exp(\alpha x/l) - 1 \quad (1)$$

式中 x 为渐变波导 II 中任意一点与波导 I 末端的水平距离; l 为波导 II 的长度(根据粗略模拟计算结果取 $l=100\mu\text{m}$); α 为指数函数的系数.

图 2(a)是宽度分别为 10 和 $1\mu\text{m}$ 的波导 I 与 III 通过中间渐变波导 II ($\alpha=1.75$) 连接后的理论模拟光场分布图;图 2(b)是图 2(a)放大后的结果;图 2(c)为波导 I 与 III 通过中间锥形结构连接后放大的理论模拟光场分布图.比较图 2(a)和(c)可看出,锥形结构连接的微纳集成光波导,光场分布比较发散,利用本文提出的指数结构连接的微纳集成光波导能很好的将光场约束在所设计的波导中.

利用同样方法模拟得到宽度为 $10\mu\text{m}$ 的波导 I 分别与宽度为 800nm ($\alpha=2.1$) 和 500nm ($\alpha=1.5$) 的波导 III 通过渐变波导 II 集成后的理论模拟光场分布,分别如图 3 和 4 所示.从图 2~4 对不同尺寸微

纳集成光波导光场模拟的结果都可以看出,本文提出的指数结构比传统的锥形结构能更好地将传输光约束和耦合到纳米级波导中.根据模拟计算得到,这

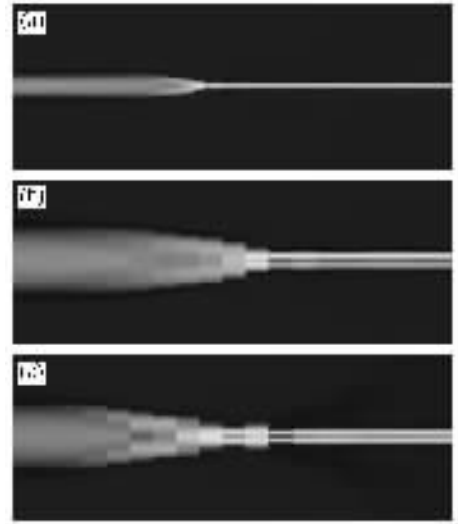


图 2 采用指数函数结构和锥形结构分别将 $10\mu\text{m}$ 波导 I 与 $1\mu\text{m}$ 波导 III 集成后的光场模拟图 (a) 指数函数结构波导; (b) 图(a)的放大部分; (c) 锥形结构波导

Fig.2 Simulation optical fields of integrated different configurations between $10\mu\text{m}$ waveguide I and $1\mu\text{m}$ waveguide III (a) Exponential configuration; (b) Enlarged view of (a); (c) Tapered configuration

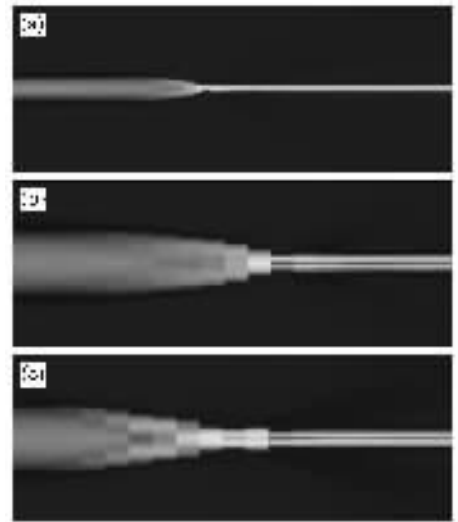


图 3 采用指数函数结构和锥形结构将分别将 $10\mu\text{m}$ 波导 I 与 800nm 波导 III 集成的光场模拟图 (a) 指数函数结构波导; (b) 图(a)的放大部分; (c) 锥形结构波导

Fig.3 Simulation optical fields of integrated different configurations between $10\mu\text{m}$ waveguide I and 800nm waveguide III (a) Exponential configuration; (b) Enlarged view of (a); (c) Tapered configuration

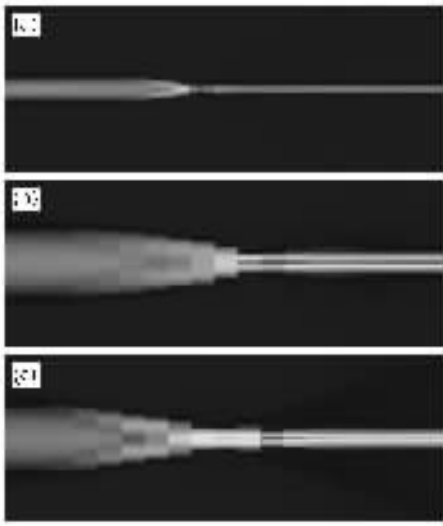


图4 采用指数函数结构和锥形结构将分别将 $10\mu\text{m}$ 波导 I 与 500nm 波导 III 集成后的光场模拟图 (a) 指数函数结构波导; (b) 图(a)的放大部分; (c) 锥形结构波导

Fig. 4 Simulation optical fields of integrated different configurations between $10\mu\text{m}$ waveguide I and 500nm waveguide III (a) Exponential configuration; (b) Enlarged view of (a); (c) Tapered configuration

种指数结构连接的微纳集成光波导的插入损耗在 $1\sim 2.5\text{dB}$ 之间. 另外需要指出的是, 本文所提出的指数结构中的 α 是一个松散的条件, 也就是说 α 的取值要求并不严格, 这一点也有利于器件的研制.

从上面的分析可知, 这种指数结构的微纳集成光波导的工艺制作要比 Chang 等人所报道的、在波导的一端设计由一个凸透镜和一个凹透镜组成的望远镜式光波导容易制作, 且设计和制作容差都比较

大, 因而是一种经济可行、易于见效的微纳集成光波导, 将在新一代全光通信用微纳新原理光电子器件及功能集成的发展中起到重要的作用.

4 结论

通过理论分析和模拟设计得到了一种插入损耗在 $1\sim 2.5\text{dB}$ 之间、基于 Si 基半导体材料的微纳集成光波导. 这种微纳集成光波导可用于光纤通信系统中并解决芯径为 $10\mu\text{m}$ 的单模光纤与纳米量级的光子晶体波导器件间的光对接、耦合和互连的难题, 还可缩小光波导器件芯片的单元尺寸, 有利于提高器件的集成度.

参考文献

- [1] Alder T, Stöhr A, Heinzelmann R, et al. High-efficiency fiber-to-chip coupling using low-loss tapered single-mode fiber. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2002, 12(8): 1016
- [2] Fan R S, Hooker R B. Tapered polymer single-mode waveguides for mode transformation. *J Lightwave Technol*, 1999, 17(3): 466
- [3] Motomi O, Kasaya K, Miyazawa H. Design of a single-mode tapered waveguides for low-loss chip-to-fiber coupling. *IEEE J Quantum Electron*, 1994, 30(8): 1787
- [4] Ahmad S, Voravut S. A tapered graded-index lens: analysis of transmission properties and applications in fiber-optic communication systems. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, 33(12): 2159
- [5] Chang C, Wu M, Hsieh W. Design of low-loss tapered waveguides using the telescope structure compensation. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2003, 15(10): 1378

Theoretical Analysis and Design of Si-based Micro- and Nano- Integrated Optical Waveguides *

Chen Zhiwen, Li Zhangjian, Zhu Qile, Zhao Yuzhou, Lin Xubin, Li Jing,
Cai Zhigang, Wang Gang, and Li Baojun

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: A micro- and nano- integrated optical waveguide configuration is proposed and theoretically designed. It consists of a straight section ($10\mu\text{m}$ in width), an exponential section (gradual change in width from $10\mu\text{m}$ to 500nm), and a straight section ($1\mu\text{m}$, 800nm , and 500nm in width). The results are compared with those of conventional tapered and lensed waveguide configurations and show that the proposed exponential configurations have higher performances than tapered and lensed ones. Its fabrication technology is as same as the tapered one or even simpler than the lensed one. This micro- and nano-integrated waveguide is very easy to couple light beam from a single mode fiber into a photonic crystal device. It has potential applications in next generation of all optical communications systems.

Key words: micro- and nano- integration; optical waveguide; integrated optics; integrated optoelectronics

PACC: 4280L; 4282

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0229-04

* Project supported by the Key Project of Chinese Ministry of Education (No. 104144), the Doctoral Foundation of Institute of Higher Education of China (No. 20040558009), and the Foundation of Guangdong Provincial Science and Technology Program (No. 2003A1060201)

Received 16 November 2004, revised manuscript received 20 December 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics