

doi:10.13756/j.gtxyj.2014.03.019

光电器件研究与应用

SOI 基波导与光纤耦合的进展研究

周飞亚¹, 张敏明¹, 何 岩², 刘德明¹

(1. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074; 2. 烽火通信科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要:当前以电子作为信息载体的微电子技术遭遇到发展瓶颈。光传输具有带宽大、速率高的特点,将光子载体与电子载体相结合是未来信息传输发展的必然趋势。波导与光纤的高效耦合是实现光电子集成的关键。文章介绍了国内外几种典型耦合器的最新进展,包括楔形耦合器、GRIN(渐变折射率)透镜耦合器和垂直光栅耦合器,并对它们的性能指标、优缺点进行了比较分析,对进一步提高耦合效率的可行性进行了展望。结果表明,垂直光栅耦合器具有耦合效率高、带宽大、工艺成熟、工艺容差大和耦合步骤简单的优势,在光通信与集成光电子学领域有着广阔的应用前景。

关键词:硅基光子学;耦合器;耦合效率

中图分类号: TN622

文献标志码: A

文章编号: 1005-8788(2014)03-0060-04

Latest advances in the coupling between SOI-based waveguides and fibers

Zhou Feiya¹, Zhang Minming¹, He Yan², Liu Deming¹

(1. School of Optics and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. FiberHome Telecommunication Technology Co., Ltd. Wuhan 430074, China)

Abstract: The microelectronic technology, which uses electrons as its information carrier, is currently running into the bottleneck of development. As optical communication is characteristic of broad bandwidth and high transmission rate, it is an inevitable trend for the development of future information transmission to integrate photonic carriers with electronic carriers. The highly-efficient coupling between waveguides and fibers is the key to realizing photoelectronic integration. This paper reviews the latest advances in the development of several typical couplers at home and abroad, including the tapered coupler, Gradient Refractive Index (GRIN) lens coupler and vertical grating coupler. In addition, it compares and analyzes their performance indexes, advantages and disadvantages and predicts the feasibility of further improving their coupling efficiencies. The results show that with the advantages of high coupling efficiency, wide bandwidth, mature technology, large process tolerance and simple coupling steps, vertical grating couplers have a broad prospect of applications in the fields of optical communication and integrated optoelectronics.

Key words: silicon-based photonics; coupler; coupling efficiency

0 引 言

得益于硅基材料在微电子领域的统治地位,以及其在光子学器件应用中的巨大优势,SOI(绝缘衬底上的硅)成为实现光电子集成的最具竞争力的材料。然而,光纤与硅基器件的高效耦合成为限制 SOI 器件应用于实际通信系统的关键问题。

单模光纤 SMF-28 在 1 550 nm 处的模场近似为高斯分布,直径约为 10.4 μm ,而常用的硅基条形波导的光模斑尺寸 $< 1 \mu\text{m}$,两者相差两个数量级。如果采用直接耦合实现光纤与波导的互连,将会造成 10 dB 以上的损耗。

迄今,研究人员已经提出了多种耦合方法来解决这个难题,一些方法已接近实用化。这些方法主要从两方面来改善模斑失配:(1) 扩大波导的输出模斑,如楔形耦合器、波导光栅耦合器;(2) 减小光纤的输出模斑,如透镜耦合器。本文将对这三种典型耦合器近年来的最新研究进展进行介绍,并对它

们各自的优缺点进行比较分析。

1 基于 SOI 的耦合器进展介绍

为了降低硅基波导与单模光纤直接的耦合损耗,研究人员提出了多种耦合方法。楔形耦合器、透镜耦合器和波导光栅耦合器是其中较为典型的三种耦合器,它们在扩大波导输出模斑、减小光纤输出模斑方面具有较好的效果,能够有效提高耦合效率。

1.1 楔形耦合器

从本质上说,楔形耦合器就是一个锥形波导,通过波导宽度、厚度以及折射率的逐渐变化,实现光纤与波导之间水平与垂直方向的模式转换。

1.1.1 三维楔形耦合器

与二维楔形耦合器相比,三维结构最大的优势在于在垂直方向对波导的输出模场进行了展宽,耦合效率更高。

台湾科学家 Ming-Chang Lee 等对三维楔形耦合器进行了深入研究。2011年,他们提出了如图1所

收稿日期:2013-12-12

基金项目:国家“八六三”计划资助项目(SS2012AA010407);科技支撑计划资助项目(2012BAH06B03)

作者简介:周飞亚(1990—),男,江苏南通人。博士研究生,主要从事光通信与光器件研究。

示的三维楔形耦合器^[1]。该结构主要由三维结构的 SU8 材料的楔形波导、SiON（氮氧化硅）条形波导、SiO₂（二氧化硅）平板波导组成，实验结果测得耦合损耗为 3 dB。该器件制作工艺简单，能够制作倾角低至 0.6° 的楔形结构，且表面光滑，粗糙度仅为 3.5 nm。2013 年，该课题组对三维楔形耦合器进行了改进，在 SiON 条形波导上增加了一个反向楔形波导，有效地提高了耦合效率。实验测得 TE 模的耦合效率为 2.8 dB，且 3 dB 对准容差为 3 μm。

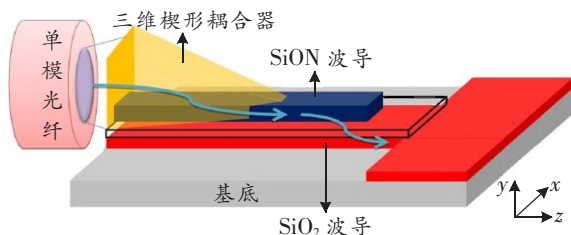


图 1 三维楔形耦合器示意图

1.1.2 双层/多层楔形耦合器

现有工艺条件下，波导垂直方向的锥形面加工较为困难，需要采用遮光板刻蚀、灰度掩膜光刻、各向异性湿法腐蚀等技术。而采用双层/多层楔形波导耦合结构，能够实现与三维锥形耦合器相同的效果，且制作过程大为简化。

2008 年，Intel 公司的 Assia Barkai 等^[2]利用干法刻蚀和外延生长的方法，制造出一种双层楔形耦合器，如图 2 所示。入射光经过上楔形、下楔形两个楔形结构，再进入条形波导，实现了光模斑的逐渐转换。实验结果表明，输入光波长为 1 550 nm 时，该楔形耦合器是偏振无关的，耦合损耗为 1.3 dB。在此基础上，该公司的 Neil Na 等对上述结构进行了改进，上楔形结构使用 SiGe（锗化硅）材料制作。实验测得，耦合损耗为 1.1 dB，且 1 dB 耦合对准容差长达 5.5 μm。

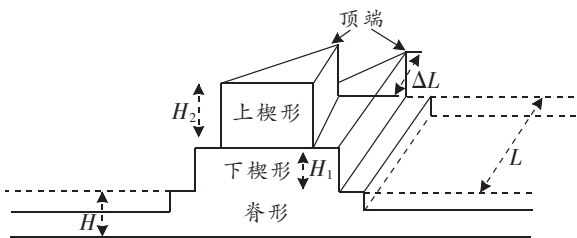


图 2 双层楔形耦合器

通常楔形耦合器的尺寸较大，不利于集成。从减小器件尺寸的角度出发，2010 年，美国 MIT 大学的 Anatol Khilo 等^[3]提出了一种新的双层楔形耦合器，在该耦合器的下层低折射率波导中插入了一个

反向楔形耦合器。与传统的反向楔形耦合器相比，双层结构能够减小耦合器长度，低折射率波导的折射率越高，长度减少越明显。

2012 年，台湾国立清华大学的 Lee 等^[4]在双层结构的基础上，提出了一种多层结构的楔形耦合器。该耦合器在双层楔形耦合器的上层添加了一层高分子聚合物波导，其折射率为 1.65。实验测得耦合效率高达 75%，并且通过增大脊形波导上交叉区域的面积，可以进一步提高耦合效率。尽管该器件的工艺误差容忍度较高，但制造较为复杂，且器件长度为 2 000 μm，不便于实现小型化集成。

1.2 透镜耦合器

透镜耦合的原理在于，入射光在透镜导光层的界面发生全反射，在满足相位匹配的条件下，能够实现与硅基波导的高效耦合。近几年，透镜耦合器研究的重点主要集中于 GRIN（渐变折射率）透镜耦合器，新加坡科学家 Ter-Hoe Loh^[5]等人在该方面做了大量细致而出色的工作。

2011 年，该团队提出一种单层 GRIN 透镜耦合器结构设计，如图 3 所示。在该耦合器中，GRIN 透镜的折射率特性呈现高斯分布，相比抛物线形分布，当入射角增大时，高斯分布的像差变化小，焦距较为稳定。理论上，该耦合器的耦合效率高（90%），便于集成，且工艺容差大。2012 年，该团队利用 Si、SiO₂ 交替沉积的方法，制造出折射率呈现周期性变化的多层 GRIN 透镜，该透镜可以通过 ICP（电感耦合等离子体）工艺来实现，较为简单。实验测得耦合效率最高可达 60%。

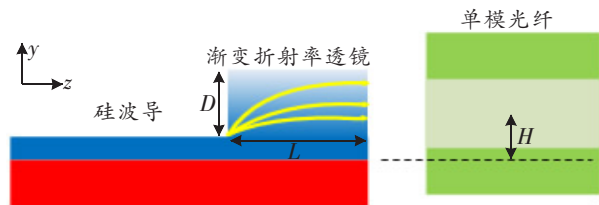


图 3 单层 GRIN 透镜耦合器

1.3 垂直光栅耦合器

波导光栅是光栅耦合器的核心部分，利用波导光栅的漏波辐射可实现模斑在竖直方向的转换，在光栅的衍射作用下，波导中的光能够高效地耦合进光纤。当前，侧向耦合与垂直耦合是两种常用的耦合方式。侧向耦合操作繁琐，对准精度要求高，而垂直耦合方法工序简单，便于光路布局，对准容差大，有实现大规模商业化应用的潜力。

限制垂直光栅耦合器的耦合效率的两大因素分别是：（1）方向性较差，这意味着从波导向上耦合进

光纤的光占总入射光的比例较低。(2) 光从光栅中衍射出来时, 光场按指数形式分布, 然而单模光纤中的光场近似于指数分布。这样的模式不匹配限制了耦合效率的进一步提高。下面从解决这两个限制因素的角度介绍几种有代表性的垂直光栅耦合器。

1.3.1 镀膜光栅耦合器

为了解决方向性较差的问题, 可以在传统周期性光栅耦合器上添加一层覆盖层, 或者在光栅下部添加一个反射层。

2010 年, 比利时 Ghent 大学的 D. Vermeulen 等^[6]在基片上覆盖了一层多晶硅, 使得向上衍射的光得到增强, 如图 4 所示。实验测得该耦合器的耦合效率为 69.2%。2013 年, Delaware 大学的研究人员在 220 nm 的硅层上覆盖了一层 2.3 μm 的 SiO_2 。实验测得该结构的耦合效率为 53.7%, 这是 220 nm 顶层硅条件下浅刻蚀光栅耦合效率的最高值。

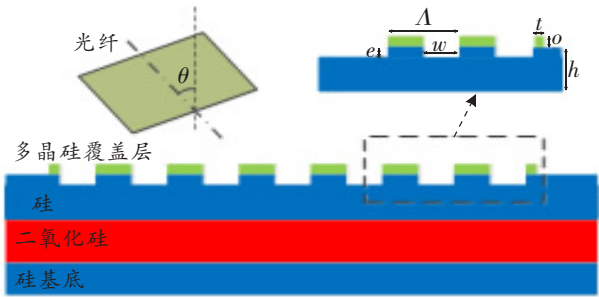


图 4 覆盖多晶硅的光栅耦合器

在光栅下部使用背向反射镜, 可以将射入基底的光反射回硅波导中, 同样能提高光的方向性系数。2009 年, Ghent 大学的研究人员通过 Si 和 SiO_2 交替沉积的方式在光栅中引入了一个底部布拉格反射层, 该工艺与 CMOS(互补金属氧化物半导体)工艺兼容。实验测得耦合效率为 69.5%。

2012 年, 德国科学家 Wissem Sfar Zaoui^[7]在 SiO_2 与 Si 基底的交界处引入一层铝, 充当背向反射镜, 用于提高结构的方向性系数, 如图 5 所示。实验测得, 该光栅耦合器的耦合效率最高可达 69.2%, 与没有金属反射镜的情况相比, 提高了 1.6 dB。

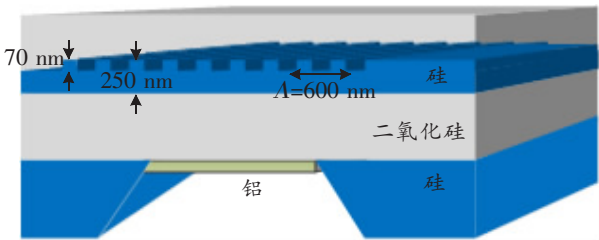


图 5 引入金属反射镜的光栅耦合器

1.3.2 非均匀耗散系数光栅耦合器

对于波导与光纤中模场分布不匹配这一问题, 解决方法是通过调整每个周期内刻槽的宽度或深度, 得到非均匀的耗散系数, 实现更好的模场匹配。

二元闪耀光栅由一系列等高不等宽的光栅组成, 通过改变光栅占空比可实现对折射率的调制, 它可以看作是在宽度方向上离散化的闪耀光栅。2007 年, Junbo Feng^[8]基于二元闪耀光栅设计了一种耦合光栅, 如图 6 所示。该光栅由双层二元闪耀光栅构成, 能够实现对 TE、TM 混合光的分束与耦合。理论结果表明, 上层光栅对 TE 光的耦合效率为 58%, 下层光栅对 TM 光的耦合效率为 50%, 两者消光比最大可达 28 dB。

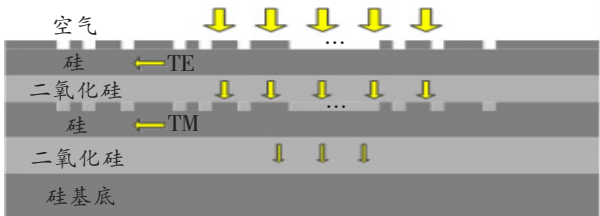


图 6 双层二元闪耀光栅耦合器

与二元闪耀光栅的原理相似, 在浅刻蚀光栅中调整每个周期中光栅的刻槽宽度, 改变其耦合强度, 能够得到近高斯分布的输出光场。2010 年, 香港中文大学的 Hon K. Tsan 等^[9]研制出了该结构的光栅耦合器。其优势在于能够有效地抑制背向反射, 耦合效率高达 75.8%, 为当时条件下耦合效率的最大值。

2013 年, 新加坡科学家 Chao Li^[10]等利用深紫外光刻工艺制作了一种双刻蚀光栅耦合器。在该耦合器的前 4 个周期中, 刻槽深度较浅, 为 85 nm, 在后 19 个周期中, 刻蚀深度较深, 为 210 nm。两种深度不同的刻槽可以增强耦合器对入射光的限制, 并使得波导出射光场近似于高斯分布, 因此提高了耦合效率。实验测得, 该耦合器的 3 dB 带宽为 54 nm, 耦合效率高达 70.8%, 且该耦合器对刻蚀宽度的工艺容差较大。

2010 年, 浙江大学 Yongbo Tang 等^[11]通过迟滞效应, 同时改变刻槽的深度与宽度, 对光栅进行非均匀化结构设计, 使得反射损耗基本被消除, 耦合效率得到提高。实验测得, 该耦合器的耦合效率达到 64%, 1 dB 带宽为 43 nm。

2013 年, 丹麦科技大学的 Yunhong Ding^[12]制造了一种非均匀光子晶体光栅。通过改变不同周期内光子晶体的孔径, 使得该周期的等效折射率发生

变化,从而提高光栅的耦合效率。实验测得,该光栅的耦合效率为 67%。

2 不同耦合器特点比较

三维、双层/多层楔形耦合器在传统二维楔形波导的基础上,增加了对垂直方向模场的转换,耦合效率得到了提高;然而,其制作工艺较为复杂,且器件尺寸过大,不利于集成。GRIN 透镜耦合器的耦合效率高,工艺容差大,尽管其制造工艺能够与 CMOS 兼容,但是过程复杂,成功率低。垂直光栅耦合器的理论耦合效率很高,然而由于其周期数多,结构较复杂,工艺误差对其耦合效率有较大影响,且器件具有较强的偏振敏感性。通过在光栅上层或下层镀膜的方式,可以提高垂直光栅耦合器的方向性系数,提高耦合效率,但需要额外的工艺步骤;而通过调整各周期内刻槽深度或宽度的方式,能够改变其耗散系数,减小底部反射损耗,并使得波导中的模场呈现近高斯分布,从而能更好地与光纤匹配。由于垂直耦合光栅制作工艺成熟,便于集成,科研人员提出了众多有效的方法来提高其耦合效率,其应用前景广阔。通过减小工艺误差,优化结构设计,光栅耦合器必能更好地实现波导与光纤的模式转换。

3 结束语

更高的耦合效率、更小的器件尺寸、更大的工艺与对准容差、更简便的加工工艺以及偏振无关是耦合器的发展方向。本文对楔形耦合器、GRIN 透镜耦合器和光栅耦合器的最新研究进展进行了介绍,并从性能指标、优缺点等方面对三种耦合器进行了分析对比。结果表明,垂直光栅耦合器在进一步优化结构设计、减小工艺误差的基础上,借助镀层、非均匀耗散性系数设计的方法,将能够提高其方向性系数,更好地实现波导与光纤的耦合,在光通信与光电子集成领域有较广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Liao C W, Yang Y T, Huang S W, et al. Fiber-core-matched three-dimensional adiabatic tapered couplers for integrated photonic devices [J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29 (5): 770—774.
- [2] Barkai Assia, Liu Ansheng, Kim Daewoong, et al. Double-Stage Taper for Coupling Between SOI Waveguides and Single-Mode Fiber [J]. *J Lightwave Technol*, 2008, 26(24): 3860—3865.
- [3] Khilo Anatol, Popovic Miloš A, Araghchini Mohammad, et al. Efficient planar fiber-to-chip coupler based on two-stage adiabatic evolution [J]. *Opt Express*, 2010, 18(15): 15790—15806.
- [4] LEE C L, Wang L K, Hsiao C S. A Novel Coupler with High Mode Conversion Efficiency for SMF and SOI Single-Mode Waveguide Coupling Interface [C]// WOCC. Kaohsiung Taiwan; Sponsored by North Jersey Section, 2012:102—107.
- [5] Wang Q, Loh T H, Ng K T, et al. Design and analysis of optical coupling between silicon nanophotonics waveguide and standard single-mode fiber using an integrated asymmetric Super-GRIN lens [J]. *IEEE J Quant Electron*, 2011, 17(3): 581—589.
- [6] Vermeulen D, Selvaraja S, Verheyen P, et al. High-Efficiency Fiber-to-Chip Grating Couplers realized using An Advanced CMOS-Compatible Silicon-On-Insulator Platform [J]. *Opt Express*, 2010, 18 (17): 18278—18283.
- [7] Wissem Sfar Zaoui, Maria Félix Rosa, Wolfgang Vogel, et al. Cost-effective CMOS-compatible grating couplers with backside metal mirror and 69% coupling efficiency [J]. *Opt Express*, 2012, 20(26): B238—B249.
- [8] Feng Junbo, Zhou Zhiping. Polarization beam splitter using a binary blazed grating coupler [J]. *Opt Letters*, 2007, 32(12): 1662—1664.
- [9] Chen Xia, Li Chao, Fung C K Y, et al. Apodized Waveguide Grating Couplers for Efficient Coupling to Optical Fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(15): 1156—1158.
- [10] Li Chao, Zhang Huijuan, Yu Mingbin, et al. CMOS-compatible high efficiency double-etched apodized waveguide grating coupler [J]. *Opt Express*, 2013, 21 (7): 7868—7874.
- [11] Tang Yongbo, Wang Zhechao, Wosinski Lech, et al. Highly efficient nonuniform grating coupler for silicon-on-insulator nanophotonic circuits [J]. *Opt Letters*, 2010, 35(8): 1290—1292.
- [12] Ding Yunhong, Ou Haiyan, Peucheret Christophe. Ultra high-efficiency apodized grating coupler using fully etched photonic crystals [J]. *Opt Letters*, 2013, 38 (15): 2732—2734.