

文章编号:1001-5078(2007)01-0018-04

SOI 基光耦合器研究进展

刘 艳,余金中

(中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点实验室,北京 100083)

摘 要:文章综述了国内外光耦合器的最新研究进展,着重介绍了目前耦合效率最高(55%),且与偏振无关的双光栅辅助定向耦合器的工艺流程、结构性能以及进一步提高耦合效率的可行性。

关键词:耦合器;双光栅辅助定向耦合器;耦合效率

中图分类号:TN622+.2 **文献标识码:**A

The Progress of Silicon-on-insulator Couplers

LIU Yan, YU Jin-zhong

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper the latest progress of optical couplers is reviewed. The emphasis is placed on the fabrication, structures of the most efficient (55%) dual grating-assisted directional coupler and the possibility of further improving the coupling efficiency.

Key words: coupler; dual grating-assisted directional coupler; coupling efficiency

1 引 言

20世纪60年代以来,光电子集成(OEIC)获得了长足的发展。集成电路发展的主流趋势就是集成系统的小型化。在用于通信波段的众多波导材料中,SOI(silicon on insulator)材料以其无与伦比的成本优势、工艺成熟性、与IC工艺兼容等优点,使之成为最有竞争力的实现光学集成和光电子集成的候选材料之一^[1]。

然而,长期以来,SOI亚微米波导没有大规模地应用于实际通信系统。这是由于波导中的模斑尺寸小于 $1\mu\text{m}$,而光纤中的模斑尺寸为 $8\sim 10\mu\text{m}$,光从光纤进入这种小尺寸的波导经常会带来很大的损耗,其原因在于二者之间模斑尺寸以及有效折射率的失配,这将导致辐射模以及背反射的出现。所以在集成光电子学领域,两者之间的耦合问题是一个长期具有挑战性的课题。目前在III-V族材料中,已经报道了运用楔形耦合器^[2-3]把光从单模光纤耦合进波导,并且获得了较高的耦合效率。硅基SOI

波导的耦合问题也逐渐引起了研究者的兴趣。

2 不同结构的硅基 SOI 耦合器

基于以上损耗的分析,为了降低光纤和波导之间的模式失配和折射率失配,研究人员已经提出了许多耦合方法,如楔形模斑转换器^[4-6](spot size converter)、反向楔形耦合器^[7]、棱镜耦合^[8]、透镜耦合^[9]、光栅耦合^[10-13]等。

2.1 正向楔形模斑转换器

在集成电路中,通常用楔形结构作为模斑转换器来跟外界的元件连接。楔形模斑转换器的功能就是把光纤中的模式转化为波导中的模式,通常有正向和反向两种楔形结构。正向楔形结构是最直观的一种结构,与光纤连接的一端扩展为光纤尺寸大小,

基金项目:国家自然科学基金(60336010);973项目(G20000366);863项目(2002AA312060)资助。

作者简介:刘 艳(1979-),女,2004年至今就读于中科院半导体所集成光电子国家重点实验室,光电子专业,现从事SOI基光耦合器的研究。E-mail:liuyan@red.semi.ac.cn

收稿日期:2006-06-23;**修订日期:**2006-07-12

与波导连接的一端拉成楔形。正向模斑转换器从外形上可以区分为三类:仅在水平面上作楔形变换的模斑转换器^[4]在垂直面上的做楔形变换的模斑转换器^[5]以及水平和垂直两个方向同时变化的模斑转换器^[6]。Delaware 大学报道了用灰度掩膜制造更加有效的三维绝热的楔形耦合器^[5],如图 1 所示。受抗蚀膜的分辨能力的局限,耦合器垂直方向上为楔形,所以这种耦合器不能实现水平方向的模斑变换。这种楔形耦合器虽然制作工艺相对复杂,但其非常适合高密度单片集成,而且,这种楔形耦合器的衬底还能进一步用于制作其他 OIC 元件。由于制作足够光滑的表面相对困难,损耗主要来源于表面粗糙带来的散射,同样楔形结构需要一个抗反射的包层来降低强烈的表面背反射,给制作带来麻烦。而且,一旦楔形结构小型化,表面粗糙会带来大量背反射。

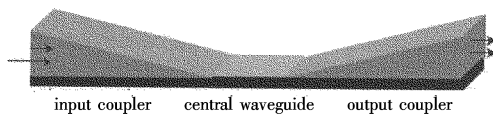


图1 楔形耦合器示意图

2.2 反向楔形耦合器

反向楔形结构是在与光纤连接的一端尺寸减小到几十纳米,这就意味着波导的模式在波导中心限制作用被削弱,模场离开波导中心,大量泄漏到包层中,随着模斑尺寸的增大,模式的有效折射率随之减小,从而实现折射率的匹配和波导模场跟光纤模场的交叠面积的增加。Cornell 大学制造的这个纳米楔形耦合器^[7]包括一个波导,横向拉锥成纳米尺寸的尖端后再跟光纤连接,如图2所示。尽管这种反

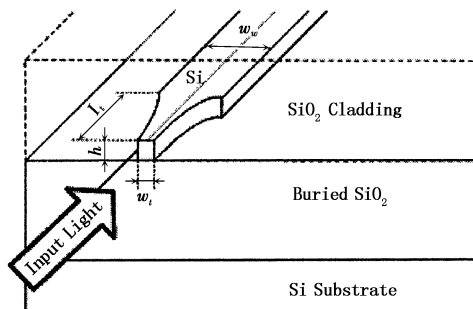


图2 波导和纳米楔形耦合器示意图

向楔形耦合器设计很巧妙,但是损耗仍然高达 3dB 以上。损耗主要来源于光纤和耦合器尖端的模场失配以及尖端处弱限制的模场与波导中强限制模场之间的转换。这种纳米楔形耦合器的另一个显著优点就是其未对准容差很大,对于水平和垂直方向上 1.2 μm 的未对准值带来的附加插入损耗仅仅为

1dB,这主要是因为尖端处模场尺寸很大。Cornell 大学的耦合器是目前报道尺寸最小、效率最高的连接亚微米波导和光纤的 SOI 耦合器,但是偏振敏感性不足,需进一步改进。

2.3 光栅辅助垂直耦合器

光栅耦合器是通过光栅的衍射作用把光纤中的光有效地耦合进波导,可以采用垂直耦合结构^[10],也可以采用平行耦合结构^[11-13]。理论上光栅耦合器具有很高的耦合效率,是一种非常有前途的耦合方法,但是传统光栅耦合器^[11-12]并不适合光学集成电路,因为它很难达到模式匹配,对波长也相当敏感,制作工艺难度较大,对偏振也相当敏感,而且对光的入射角有严格的限制,很难实用化。

2.3.1 垂直光栅辅助耦合器

比利时 Ghent 大学研制的这种耦合器是把单模光纤和 240nm 厚的 GaAs - AlO_x 波导进行垂直耦合^[10],如图 3 所示。基于短二级光栅或者光子晶体的理论,在覆盖有低折射率的氧化物包层的波导上刻蚀出来。垂直耦合首先要解决两个难题:光从单模光纤进入平面波导必须转角 90°;光首先从光栅进入较宽波导,然后经过模斑转换器进入小尺寸波导,模斑转换器的长度必须要小。它的结构相对复杂,光栅包括耦合光栅和反射光栅,这种多层反射光栅的添加将耦合效率大大提高。跟平行耦合相比较,垂直耦合的显著优点就是对于水平面上对准要求不高,水平面上任何方向 2 μm 的未对准值所带来的附加损耗不足 1dB。这种垂直耦合机制不需要拆开器件,给高密度集成和晶片规模检测提供了方便。

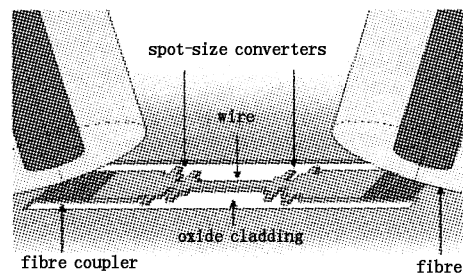


图3 垂直光栅辅助耦合器示意图

2.3.2 双光栅辅助平行定向耦合器

英国 Surrey 大学 Reed 领导的研究小组报道了这种双光栅辅助定向耦合器^[13],如图 4 所示。该结构主要是由一个与光纤相匹配的大尺寸 SiON 波导及一个大尺寸 SiON 波导和小尺寸 SOI 波导之间起过渡连接作用的 Si₃N₄ 波导构成,三个波导是在垂

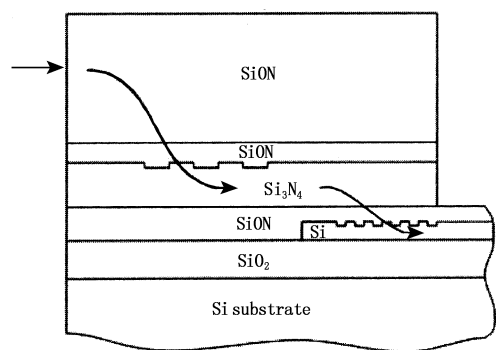


图4 双光栅辅助定向耦合器示意图

直于衬底的方向上一层一层淀积而成,波导之间通过光栅相互连接。顶层 SiON 折射率为 1.478,跟光纤比较接近,折射率失配带来的插入损耗小于 0.05dB。所以光纤可以跟较厚的 SiON 层直接对接,然后用第一个光栅把光耦合进 Si₃N₄ 层,用第二个

光栅耦合进较薄的 SOI 层。中间的 Si₃N₄ 过渡层非常关键,因为它保证了两个光栅都有较高的耦合效率。原材料采用了 unibond 技术制造的 4in Si 衬底,3 μ m 的 SiO₂ 以及 230nm 的 Si 外延层。通过合理设计波导尺寸和在生长过程中控制应力分布,降低了耦合器的偏振相关性,实验测得该器件是偏振无关的,耦合效率的实际测量值为 55%,是目前报道的最有效的跟小尺寸波导耦合的光栅辅助定向耦合器,并且作者正在着力于拓展带宽的研究。

2.4 性能比较

本文简要介绍了国内外连接光纤和波导的耦合器的最新研究进展,表 1 比较了文献中给出的一些耦合器的结构特性。综合比较,平行光栅耦合结构的耦合效率较高,结构也相对简单,是一种非常有前途的耦合方法。

表 1 几种典型耦合器性能比较

结构	耦合效率理论值	耦合效率测量值	耦合器长度	所用工艺	偏振特性	3dB 带宽	参考文献
正向楔形	82%	45%	600 μ m	高能束敏感玻璃,高能电子束,紫外灰度光刻,感应耦合等离子刻蚀	—	—	[5]
反向楔形	46.8% TM 25.1% TE	38% TM	40 μ m	—	有	—	[7]
垂直光栅耦合 + 2D 楔形模斑转换	74% TE	19% TE	2mm	电子束曝光,反应离子刻蚀,金属有机物气相外延	有	60nm	[10]
双光栅辅助定向耦合器	93%	55%	>2mm	等离子增强化学气相沉积,感应耦合等离子刻蚀,普通光刻	无	4nm	[13]

3 结束语

耦合器总的发展趋势是追求耦合损耗低、器件尺寸短、对对准误差并不敏感和制作简便。通过比较发现平行光栅耦合结构的耦合效率最高(55%)且结构简单,值得研究。该设计难点在于:①确定 SiON 波导的组分和厚度以得到与光纤相匹配的折射率,减少光纤到 SiON 波导的耦合损耗;②确定 Si₃N₄ 波导的组分和厚度,实现尺寸和折射率都相差很大的 SiON 波导和 SOI 波导之间的良好连接;③确定三个波导之间隔离层的厚度、折射率和耦合光栅的结构参数(刻蚀深度、占空比、光栅周期等),以得到波导之间较高的耦合效率和减小耦合长度。从制作上来说,多层结构的生长以及在小尺寸 SOI 波导上刻蚀光栅是两个难点。另外,该结构也存在一些缺点,需要进一步地优化和改进。采用光栅结构使得耦合带宽相当窄(仅为 4nm),可望通过光栅啁啾和改变占空比来增加带宽;波导模式在侧向的匹配

需要进一步考虑,尽管它在垂直方向上能够获得较高的耦合效率,但侧向的模式失配同样可能造成很大的耦合损耗,可以考虑采用楔形波导结构或梯形截面波导结构。相信随着研究的深入,平行光栅耦合器从结构设计到器件制作都会进一步地优化,预期耦合效率将会逐渐接近理论值 90%,带宽也将达到几十纳米,该类器件必将获得长足的发展和越来越广泛的应用。

参考文献:

- [1] R A Soref, J P Lorenzo. All silicon active and passive guided-wave components for $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ and $1.6\mu\text{m}$ [J]. IEEE J. Quantum Electron., 1986, 22: 873 - 879.
- [2] R N Thurston, E Kapon, A Shahar. Two dimensional control of mode size in optical channel waveguides by lateral channel tapering[J]. Opt. Lett., 1991, 16: 306 - 308.
- [3] K Kasaya, O Mitomi, M Naganuma, et al. Simple laterally tapered waveguide for low-loss coupling to single-mode fibers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1993, 5: 345 - 347.

- [4] I Day, I Evans, A Knights, et al. Tapered Silicon Waveguides for Low Insertion Loss Highly-Efficient High-Speed Electronic Variable Optical Attenuators [M]. OFC2003, 1:249 - 251.
- [5] A Sure, T Dillon, J Murakowski, et al. Fabrication and characterization of three-dimensional silicon tapers [J]. Opt. Express, 2003, 11:3555 - 3561.
- [6] Lorenzo Pavesi, David J Lockwood, Silicon Photonics [M]. Springer, Berlin, 2004.
- [7] V R Almeida, R R Panepucci, M Lipson. Nanotaper for compact mode conversion [J]. Opt. Lett., 2003, 28:1302 - 1304.
- [8] Z Lu, D W Prather. TIR-Evanescent coupler for fiber to waveguide integration of planar optoelectronic devices [J]. Opt. Lett., 2004, 29:1784 - 1750.
- [9] S Janz, B Lamontagne, A Delage, et al. Single layer a-Si GRIN waveguide coupler with lithographically defined facets [A]. IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2005, 129 - 131.
- [10] D Taillaert, W Bogaerts, P Bienstman, et al. An out-of-plane grating coupler for efficient butt-coupling between compact planar waveguides and single-mode fibers [J]. IEEE J. Quantum Electron., 2002, 38:949 - 955.
- [11] J K Butler, N H Sun, G A Evans, et al. Grating-assisted coupling of light between semiconductor and glass waveguides [J]. J. Lightwave Technol., 1998, 16:1038 - 1048.
- [12] R Orobtcouk, N Schnell, T Benyattou, et al. New ARROW optical coupler for optical interconnect [A]. IEEE International Conference on Interconnect Technology, 2003, 233 - 235.
- [13] G Z Masanovic, V M N Passaro, G T Reed. Dual grating-assisted directional coupling between fibers and thin semiconductor waveguides [J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2003, 15:1395 - 1397.

北京国际光电周暨第十一届 ILOPE 在京成功举办

由中国光学光电子行业协会举办的第十一届 ILOPE 展会于 2006 年 12 月 5 - 7 日在北京召开, 本次展会参展商明显多于上届, 展出面积达一万多平米。据不完全统计, 参观本次展会的专业观众近两万人。这次 LED 显示屏也有多家厂商参展, 其中不乏国内较著名的企业, 如蓝普、上海信茂、北京四通智能交通系统集成、深圳均多立等公司。

在 12 月 5 日开幕的国际光电周开幕式上, 有来自美国 SPIE、加拿大魁北克光电网络、韩国世界液晶产业合作委员会 (World LCD Industry Cooperation Committee) 的代表和来自中国科学院、中国工程院的周炳琨、周立伟、褚君浩、沈德忠、陈良惠、徐祖彦等院士及信产部和中國光协的领导及各方面的专家、企业家约 400 人出席。

中国光学学会理事长周炳琨院士和中国光学光电子行业协会韩建忠理事长分别先后致辞, 对光电周的开幕表示祝贺。

中国光学光电子行业协会韩建忠理事长在欢迎词中说, 通过展会和学术交流越来越丰富的国际化和权威性活动, 为国际光电界人士提供了了解中国光电产品及市场的机会, 同时也为中国光电企业提

供了展示的舞台。

中国光学学会理事长周炳琨院士在贺词中说这次展会是国内外同行寻求合作伙伴、技术交流、采购上游产品的好时机, 相信经过各方面的不断努力, 北京光电周将对中國光电领域的科技创新、合作起到积极的推动作用。

在特邀报告中陈良惠院士报告了现在产业化发展势头正劲的中国固态照明技术和产业的发展现状, 其对中国的重要意义和作用及 LED、OLED 技术等相关问题都作了论述。得到了与会听众的欢迎。

中科院物理所的徐祖彦院士作了新一代激光全色显示新技术的报告, 中科院上海技物所褚君浩院士作了红外光电子和信息获取传感技术发展的报告, 北京理工大学教授倪国强做了全时彩色图像融合技术发展及其关键技术分析报告。这些精彩的报告介绍了最新的科技发展和学术成果。有些是居世界前列的技术。都得到了与会者的热烈掌声和好评。

在同期举行的光电周上, 还分别举行了激光高峰论坛、红外与光学技术交流会、LED 产业论坛。

本届光电周取得了圆满的成功。

(所洪涛供稿)