

硅基光栅耦合器的研究进展*

杨彪 李智勇 肖希 Nemkova Anastasia 余金中 俞育德†

(中国科学院半导体研究所, 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

(2013年4月15日收到; 2013年5月7日收到修改稿)

硅基光子集成芯片的研究近年来发展迅速, 已成为信息技术领域中最热门的研究方向之一, 光通信、光互连、光传感等相关研发应用机构高度关注其发展, 并积极介入. 硅基光子集成芯片中, 光栅耦合器作为光信号的输入和输出装置受到极大重视, 尤其在封装和测试等环节体现出极具价值的技术优势. 本文主要分析了光栅耦合器的工作原理、基本特性及国内外的发展现状和趋势, 同时也概括了本课题组近期在该方向上的研究成果.

关键词: 光栅耦合器, 耦合效率, 绝缘体上硅, 光子集成

PACS: 42.79.Gn, 42.82.Et, 42.79.Dj

DOI: 10.7498/aps.62.184214

1 光栅耦合器的应用背景

大数据时代正步入现实, 而传统的电互连^[1,2]由于电子物理特性的局限, 其技术发展日益面临数据传输快速膨胀的需求挑战, 在带宽拓展、传输延迟、损耗控制、信噪提升等方面亟待根本性突破^[3,4], 这促使研究人员开始寻找新的解决方案. 硅基光子器件采用光传输信号, 相比于电子, 光子传输速度远大于电子运动速度, 而且光传递信号的机理是波阻抗变换, 这种变换消耗的能量很低, 在传输时信号不易发生畸变, 在大带宽条件下可以获得更大的传输容量. 而且硅基光子器件还具有与互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺兼容、尺寸小、通讯波段透明、抗辐射等优点. 正是由于具备大带宽、低延迟、低能耗、低串扰等优势^[5], 基于硅光子集成的光通信、光互连和光传感等新兴信息技术展现出构建新型信息硬件的发展趋势, 正成为新一代信息系统和网络的重要基础.

对于硅基光子集成芯片而言, 不容忽视的一个关键问题是光信号的输入与输出^[6]. 尤其是硅作为间接带隙材料, 发光效率还未能达到实用要求, 现有技术手段需要从光子芯片外部引入独立光源或

采用片上混合集成的光增益材料. 因此, 光子集成芯片在片内和片外都需要高效率、大带宽、易集成的光耦合结构. 常用的两种耦合方式一般采用端面水平耦合结构或者片上垂直耦合结构. 相比于其他各种光耦合器, 光栅耦合器利用片上光波导的垂直衍射光场实现光信号输入或输出芯片, 具有易于在线片上测试、不需要晶圆或芯片预处理、也没有严格的空间限制等优点, 成为硅基光子集成领域的研究热点. 随着 CMOS 工艺精度的逐步提高, 微米级别甚至是纳米级别的硅基波导器件也逐渐摆脱工艺的限制, 光栅耦合器也逐渐显示出其特有的技术优势, 本文主要阐述了近几年来光栅耦合器的发展现状和未来趋势.

2 光栅耦合器的基本原理

光栅耦合器是一种衍射结构. 布拉格条件可用于描述光栅中入射光和衍射光波矢之间的关系 (图 1(a)). 对于周期性的衍射结构, 布拉格条件为

$$K_z = K_{in,z} + mK \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots). \quad (1)$$

对于光栅结构的布拉格条件则可以表示为

$$K_z = \beta + mK \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots), \quad (2)$$

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CB301701)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 (批准号: KG CX2-EW-102) 和国家自然科学基金 (批准号: 61107048, 61275065) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yudeyu@semi.ac.cn

其中 β 为波导中入射波的波矢, 考虑到光向外衍射 $|\mathbf{K}| = k_0 n_1$. 当 $K_z = \beta$ 时, 一级衍射垂直于光栅表面, 二级衍射的传播方向与入射波相反, 也就是谐振态 (图 1(b)). 在这种情况下, 二级衍射的能量

比例较大, 垂直耦合的损耗非常大. 而光栅设计时采用失谐态, 一级衍射与光栅表面法线的夹角约为 $8^\circ - 12^\circ$, 可有效降低二级衍射能量比值, 增强一级衍射光强、提高耦合效率 (图 1(c)).

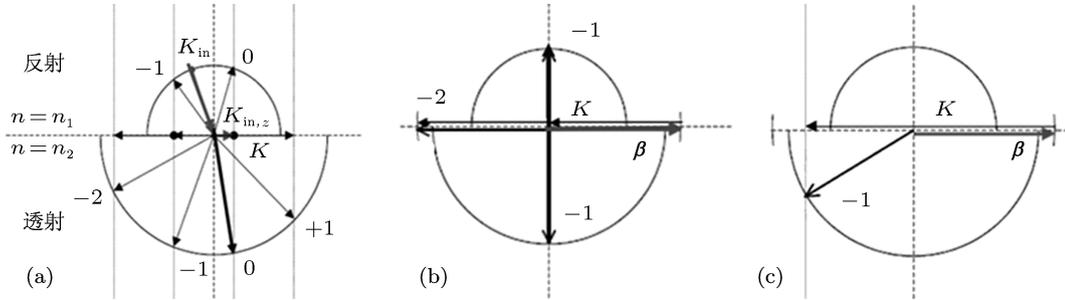


图 1 (a) 周期结构的布拉格条件; (b) 谐振态; (c) 失谐态

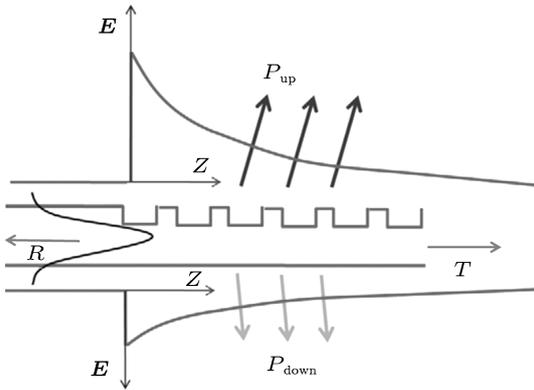


图 2 光栅耦合器中光场的传播

布拉格条件给出了理想状态下光栅的耦合方程, 由此确定可能的衍射光方向. 实际应用中, 对于长度有限的光栅结构, 衍射光谱有了一定宽度, 而结构设计中引入的啁啾变化可进一步展宽衍射光谱, 这对于实现宽带光栅耦合器非常有利. 光栅结构的宽度也对衍射的方向性和强度有一定影响, 其特性分析需要采用高精度的数值计算方法, 如有限时域差分 (FDTD) 等. 图 2 所示为光栅耦合器的经典模型, 其中光栅耦合器的耦合效率是由衍射强度、方向性效率和耦合光场重叠积分三个部分共同决定的. 耦合效率 $\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3$, 其中, 衍射强度

$$\eta_1 = 1 - R - T,$$

方向性效率

$$\eta_2 = \frac{P_{up}}{P_{up} + P_{down}},$$

衍射光场与光纤光场的重叠积分

$$\eta_3 = \frac{\iint \mathbf{E} \times \mathbf{H}_{fib}}{\text{Re} \iint \mathbf{E} \times \mathbf{H} \iint \mathbf{E}_{fib} \times \mathbf{H}_{fib}},$$

其中 \mathbf{E}, \mathbf{H} 分别为衍射光场的电场与磁场分布; $\mathbf{E}_{fib}, \mathbf{H}_{fib}$ 分别为光纤中归一化的高斯模场分布.

3 光栅耦合器的类型和特性

硅基光栅耦合器件可分为一维结构和二维结构, 根据光栅单元的周期、占空比、刻蚀深度、刻蚀角度的不同又可分为均匀光栅耦合器、非均匀光栅耦合器以及闪耀光栅耦合器等. 作为硅基光子集成芯片中的耦合功能器件, 光栅耦合器的主要研究内容包括耦合效率、耦合角度、工作波长带宽、偏振相关性等.

3.1 高效率非均匀耦合结构

均匀光栅耦合器是指每个光栅的单元周期、占空比、刻蚀深度均为恒定值, 狭缝一般垂直于界面. 均匀周期型光栅耦合器的衍射模场呈指数衰减^[7], 而单模光纤的模场为高斯分布, 两者的重叠积分 η_3 受到限制, 故耦合效率受到很大的影响, 很难实现高效耦合. 尽管有很多增强耦合效率的方法, 如增加多层介质反射镜^[8]、金属反射镜^[9]、覆盖层^[10,11] 以及利用 slot 效应的大占空比光栅结构^[12] 等, 这些方法或者减小反射, 或者增强方向性, 或者减小光栅耦合器与光纤之间的反射损耗, 但是这

种衰减的衍射模场与光纤模场的重叠积分较小,耦合效率受到很大限制.均匀光栅耦合器的优点是 CMOS 工艺兼容,工艺相对简单;而且,对均匀结构的研究比较全面,加工方法比较成熟.

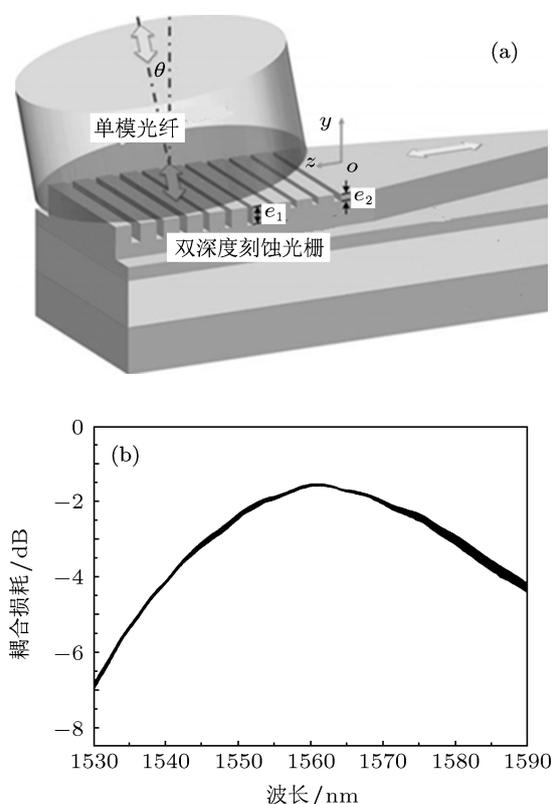


图3 (a) 双深度刻蚀光栅耦合器示意图; (b) 双深度刻蚀光栅结构测试结果

非均匀光栅耦合器^[13]有效地解决了这一模场失配的问题.所谓非均匀光栅耦合器,是指周期和占空比甚至刻蚀深度随光传播方向改变的一种准周期结构.由于这种结构不再保持严格的周期性,其衍射因子随着光栅单元结构的改变而产生对应的变化,因此衍射模场也不再呈现指数衰减,在理论上可实现衍射光场呈现高斯分布.据已有的报道,衍射模场呈现高斯型的非均匀光栅耦合器结构可以采用一组由窄变宽的狭缝构成,刻蚀深度也由浅变深,这种由波导缓变为光栅的结构降低了反射损耗,这对提高耦合效率很有帮助.由于工艺上的难题,这种光栅耦合器结构从理论提出以后发展缓慢.一种常用控制刻蚀深度的方法是利用等离子刻蚀的负载(迟滞)效应,优化刻蚀深度与狭缝宽度的对应关系^[14].随着工艺水平的提高,50 nm 以下的精细结构也可以实现,本课题组制作的非均匀光栅耦合器的最小线宽约为 40 nm,实验测量得到的单端耦合损耗仅为 0.85 dB^[15].为了解决非均匀周

期光栅耦合器对精细加工要求高的问题,2013 年 OFC/NFOEC 会议上有研究人员提出了双深度刻蚀的方法^[16],如图 3(a)所示,这种方法利用几对浅刻蚀的光栅来代替前端窄细凹槽的光栅对.由于刻蚀深度较浅,为了达到与深刻蚀光栅相同的耦合强度,必须增大凹槽的宽度,由此来降低工艺上难度,这篇报道中最小的凹槽宽度为 135 nm,耦合损耗约为 1.5 dB.

3.2 垂直耦合结构

一直以来,为了降低二阶反射,从而提高耦合效率,光栅耦合器的衍射方向呈 10° 左右的偏角,但是这种偏角不仅对实际应用形成了限制,而且也造成了封装的困难,阻碍了器件的大规模集成.垂直耦合成为了继耦合效率之后限制光栅耦合器实用化的另一待解难题.而对于 0° 偏角,也就是垂直耦合的需求显得更为迫切.

无论是均匀光栅耦合器还是非均匀光栅耦合器,垂直耦合的难题一直没有得到很好的解决.谐振态下存在二阶反射,二阶反射大大降低了耦合效率.失谐态下,二阶反射消失,耦合效率增大,但是无法实现垂直耦合.从布拉格关系可以看出,要想实现垂直耦合,必须消除或者降低二阶反射,已知的方法为增加分布式布拉格反馈(DBR)反射镜^[17],DBR 反射镜的反射光与二阶反射光干涉相消.本课题组通过增加 DBR 反射镜实现耦合效率 40% 的垂直耦合,其效率接近没有 DBR 反射镜时的耦合效率(44%).但由于工艺偏差,只能减弱二阶反射,无法完全消除,耦合效率曲线会出现起伏震荡;而且 DBR 反射镜参数的工艺控制很难,耦合器与反射镜的间距改变 100 nm 就可以使干涉相消变成干涉相长,由高效耦合变成极大损耗.因此,还需要进一步研究和改进 DBR 反射镜型光栅结构.

最理想的消除二阶反射的方法是闪耀光栅,闪耀光栅的狭缝并不是垂直于晶圆表面,而是相对光栅平面的法线方向存在一个闪耀角,衍射模场为总衍射模场的叠加^[18].但是闪耀光栅的加工要求很高,与 CMOS 工艺不兼容.针对工艺上的难题,本课题组提出了一种缓变阶梯型闪耀光栅耦合器,用多阶梯结构替代闪耀光栅的倾斜面^[19],如图 4 所示.2011 年科研人员提出的非对称亚光栅结构从理论上可以垂直耦合,同时耦合效率也没有太大损失^[20].

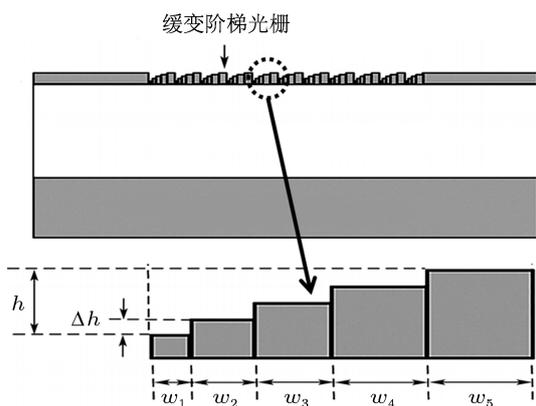


图4 渐变阶梯型闪耀光栅耦合器结构示意图

3.3 二维光栅耦合器

二维光栅耦合器大致可分为两种,一种是类似光子晶体结构的光栅耦合器,另一种是弧形光栅耦合器.

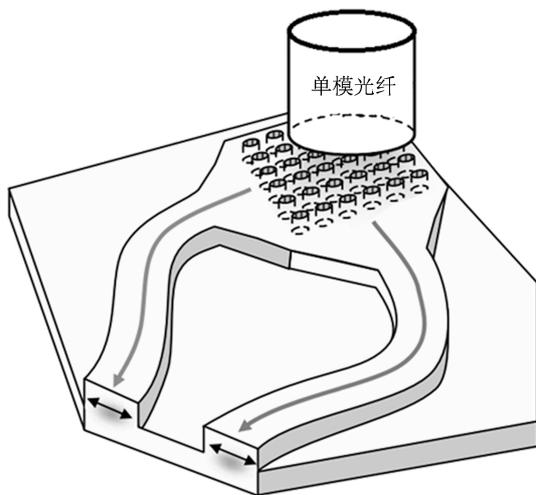


图5 2D光子晶体光栅耦合器

二维光子晶体光栅耦合器是为了解决光栅波导内的偏振问题提出的. 由于两种传输模式 (TE, TM 模) 在光栅耦合器中的传输特性差异大, 一般的光栅耦合器只能传输一种模式, 对另一种模式的传输损耗比较大. 通常用波导双折射来描述偏振相关性, 定义为 TE 模与 TM 模的有效折射率或者群折射率差, $\Delta n = n_{\text{eff}}^{\text{TE}} - n_{\text{eff}}^{\text{TM}}$. 理想状态下的偏振相关性为 0, 即零双折射. 但是, 由于无法精确控制波导的尺寸, 微小的尺寸偏差就会导致偏振相关性的变化. 此外, 偏振相关性还与波导外界的热、压力等相关, 实现偏振不敏感的难度很大. 二维光子晶体

的光栅耦合器是另一种解决方案, 如图 5 所示. 不同偏振态的光在光栅耦合器中实现分离, 在其中一路, TM 模转为 TE 模, 不同波导路径中均以 TE 模传输, 最后由另一个二维光子晶体光栅耦合器接收. 相比于前一种方法工艺难度相对降低, 这种光栅耦合器要求两路波导器件完全相同, 否则在合成时会出现失真.

弧形光栅耦合器 (如图 6 所示) 能有效增大集成度. 为了降低光栅与波导之间的模式失配, 光栅耦合器与传输波导的间距通常大于 $100 \mu\text{m}$. 弧形光栅耦合器利用了圆形或者椭圆形结构的光学聚焦特性, 所有的弧形线条有一共同的焦点, 波导放置在这个焦点处, 这大大降低了光栅区域与波导之间的间距, 相比于非弧形光栅, 弧形光栅耦合器与波导的间距一般在为 $20 \mu\text{m}$ 以下. 弧形光栅耦合器在增大集成密度的同时, 与波导之间的附加损耗也有所降低. 已报道的弧形光栅耦合器的耦合效率为 $1.25 \text{ dB}^{[21]}$.

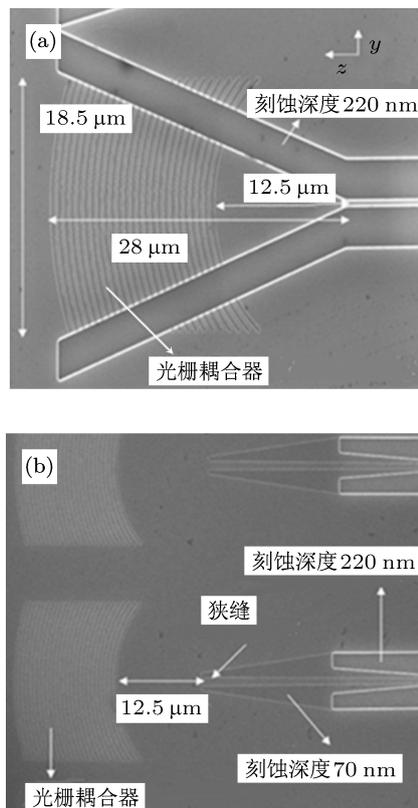


图6 (a)带锥形区的弧形光栅耦合器; (b)不带锥形区的弧形光栅耦合器

3.4 大带宽啁啾光栅

无限长的均匀光栅, 具有波长选择性的特点.

而在实际应用中, 光栅长度是有限的, 这造成了光谱的展宽, 这种展宽有一定的限度. 由于非均匀光栅耦合器的光栅结构参数并不是固定值, 根据布拉格公式, 其衍射波也不再保持单一的波长. 非均匀光栅耦合器中的啁啾结构, 就是为了提高带宽而提出的. 相比均匀光栅耦合器, 啁啾光栅增加了一个啁啾量的概念, 通常是光栅单元周期的变化. 带宽

的增加主要是由啁啾量决定的.

香港大学在制备亚波长波导光栅耦合器件时采用了“鱼骨形”结构, 如图 7 所示. 相比于普通的光栅结构, 这种鱼骨形结构光栅耦合器的 3 dB 带宽有所增加, 同时降低了背向反射 [22]. 在 1530 nm 附近达到了 90 nm, 同时弧形光栅降低了传输损耗, 理论结果为 1.7 dB, 已测的光栅耦合损耗为 3.5 dB [23].

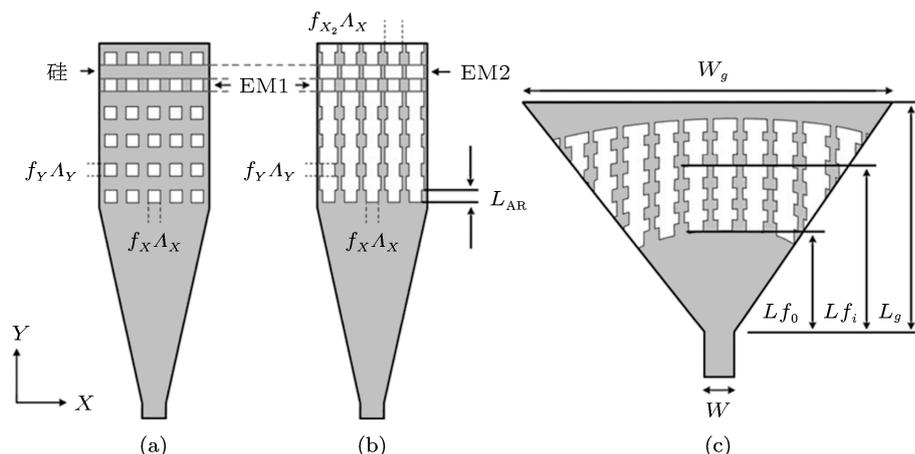


图 7 (a) 纳米孔光栅结构; (b) “鱼骨形”光栅结构; (c) 弧形“鱼骨形”结构

本组研制的啁啾光栅采用的是周期均匀变化的啁啾结构, 光栅周期呈线性变化, 模拟表明在 700 nm 的光栅平均周期, 200 nm 的啁啾量及光栅周期数为 20 时, 啁啾光栅的 3 dB 带宽增加到 140 nm, 并保证了中心波长在 1550 nm 附近. 实验测得的 3 dB 带宽为 120 nm, 与模拟结果相近.

4 本课题组的研究进展

本课题组采用与 CMOS 工艺兼容的加工方法, 先后制备了多种类型的光栅耦合器. 其中, 在提高耦合效率方面, 在优化均匀光栅结构参数 [24] 的基

础上, 通过覆盖多层介质膜降低反射损耗 [11](图 8), 利用 slot 效应增大特定衍射强度 [12], 设计非均匀周期结构实现衍射光场高斯场化等方法 [15](图 9), 耦合效率不断提高, 从常规均匀光栅耦合器的 44%, 提高至多层介质膜光栅结构的 65%. 2012 年, 非均匀光栅结构的耦合效率测量值已达到了 81.8%.

在垂直耦合方面, 通过增加 DBR 反射镜, 一端的二阶反射与 DBR 反射光干涉相消, 成功实现了垂直耦合 (10(a)); 此外还通过缓变阶梯结构来代替闪耀光栅的倾斜面, 模拟结果显示阶梯光栅的阶梯数为 5 时, 就可近似实现“闪耀”功能.

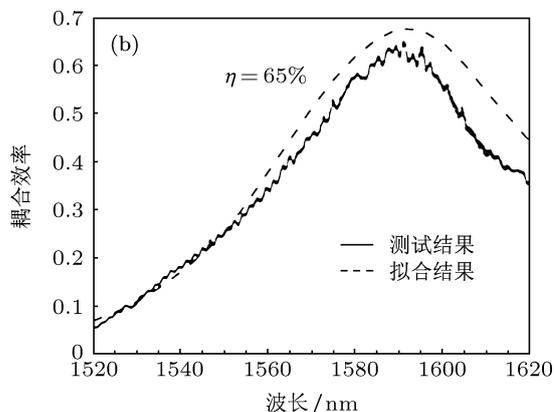
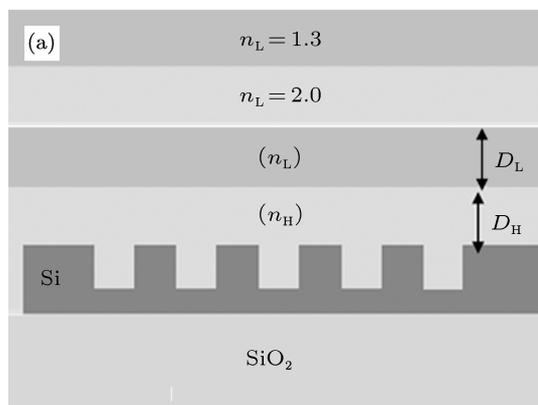


图 8 (a) 多层介质膜结构光栅结构示意图; (b) 测试结果

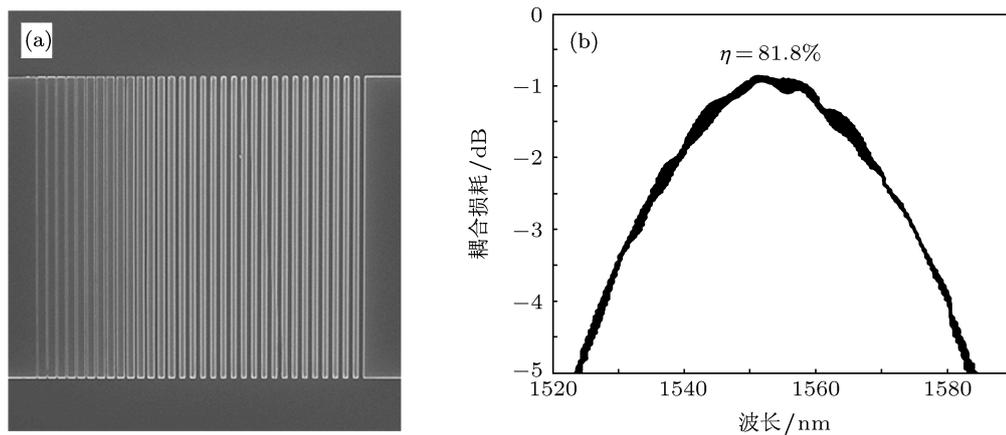


图9 (a)非均匀周期光栅结构扫描电镜(SEM)图;(b)测试结果

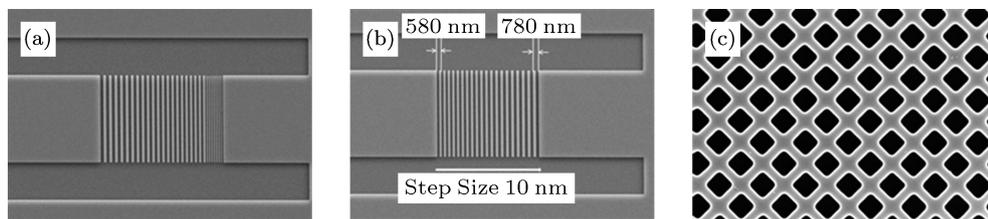


图10 (a)DBR 反射镜光栅 SEM 图;(b)喇叭型光栅 SEM 图;(c) 2D 光栅 SEM 图

表1 本课题组6种光栅结构的测试结果

结构	时间	耦合效率/%	3 dB 带宽/nm	特点
常规均匀光栅 ^[24]	2009	44	45	
多层介质膜光栅 ^[11]	2012	65	—	高耦合效率
非均匀周期光栅 ^[15]	2012	81.8	55	
带反射镜光栅	2009	40	70	垂直耦合
喇叭光栅	2010	32	120	大带宽
2D 光栅	2010	31.6	60	偏振无关

在提高带宽方面,通过制备均匀喇叭光栅结构(图10(b)),将3 dB 带宽提高到了120 nm.同时,还制备了二维光栅结构(图10(c)),实现了非垂直偏振无关耦合.

表1给出了近年来本课题组研制的6种光栅结构的特点及测试结果.

5 光栅耦合器的前景

光栅耦合器最大的优势在于其测试和集成方面,相较于端面耦合器,光栅耦合器无需抛光,没有严格的空问限制,对准容差大、加工要求相对简单,极大地增加了系统设计的灵活性,更适合大规模集成.在已报道的混合光电集成研究中,光栅耦合器与其他耦合方式相比,性能改善非常显著.随着研究工作的深入和制备工艺技术的不断发展,光栅耦合器的耦合效率、工作波长、偏振模式等特性将会继续提升,可以预期高效率、大带宽、垂直耦合的光栅耦合器将会沿着实用化的方向迅速发展并趋向成熟,成为硅基光子集成领域中不可或缺的关键单元.

[1] Kobrinsky M J, Block B A, Zheng J F, Barnett B C, Mohammed E, Reshotko M, Robertson F, List S, Young I, Cadien K 2004 *Intel Technol. J.* **8** 129
 [2] O'Connor I, Gaffiot F 2004 *Ultra Low-Power Electronics and Design* (New York: Springer) pp21-29
 [3] Jalali B, Fathpour S 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4600
 [4] Soref R 2006 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **12** 1678

[5] Miller D A 1997 *Int. J. Optoelectron.* **11** 155
 [6] Bolten J, Hofrichter J, Moll N, Schöenberger S, Horst F, Offrein B J, Wahlbrink T, Mollenhauer T, Kurz H 2009 *Microelectron. Eng.* **86** 1114
 [7] Chen X, Li C, Tsang H K 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1914
 [8] van Laere F, Roelkens G, Ayre M, Schrauwen J, Taillaert D, Thourhout D, Krauss T F, Baets R 2007 *J. Lightwave Technol.* **25** 151

- [9] Selvaraja S K, Vermeulen D, Schaekers M, Sleenckx E, Bogaerts W, Roelkens G, Dumon P, van Thourhout D, Baets R 2009 *Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference Munich*, June 2–4. 2009 p1
- [10] Roelkens G, Vermeulen D, van Laere F, Selvaraja S, Scheerlinck S, Taillaert D, Bogaerts W, Dumon P, van Thourhout D, Baets R 2010 *J. Nanosci. Nanotechnol.* **10** 1551
- [11] Anastasia N, Xiao X, Yang B, Chu T, Yu J Z, Yu Y D 2012 *Chin. Phys. Lett.* **19** 114213
- [12] Zhou L, Li Z Y, Zhu Y, Li Y T, Fan Z C, Han W H, Yu Y D, Yu J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 124214
- [13] Taillaert D, Bienstman P, Baets R 2004 *Opt. Lett.* **29** 2749
- [14] Tang Y, Wang Z, Wosinski L, Westergren U, He S 2010 *Opt. Lett.* **35** 1290
- [15] Zhang C, Sun J H, Xiao X, Sun W M, Zhang X J, Chu T, Yu J Z, Yu Y D 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 014207
- [16] Li C, Zhang H J, Yu M B, Lo G 2013 *Optical Fiber Communication Conference Anaheim*, March 17, 2013
- [17] Ura S, Murata S, Awatsuji Y, Kintaka K 2008 *Opt. Express* **16** 12207
- [18] Van Laere F, Kotlyar M V, Taillaert D, van Thourhout D, Krauss T F, Baets R 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 396
- [19] Zhou L, Li Z Y, Hu Y T, Xiong K, Fan Z C, Han W H, Yu Y D, Yu J Z 2011 *Chin. Phys. B* **20** 074212
- [20] Yang J B, Zhou Z P, Jia H H, Zhang X A, Qin S Q 2011 *Opt. Lett.* **36** 2614
- [21] Mekis A, Gloeckner S, Masini G, Narasimha A, Pinguet T, Sahni S, De Dobbelaere P 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **17** 597
- [22] Cheng Z, Chen X, Wong C, Xu K, Fung C K, Chen Y, Tsang H K 2012 *Opt. Lett.* **37** 1217
- [23] Cheng Z, Chen X, Wong C Y, Xu K, Ki T H 2012 *Opt. Lett.* **37** 5181
- [24] Zhu Y, Xu X J, Li Z Y, Zhou L, Han W H, Fan Z C, Yu Y D, Yu J Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 5

The progress of silicon-based grating couplers*

Yang Biao Li Zhi-Yong Xiao Xi Nemkova Anastasia Yu Jin-Zhong Yu Yu-De[†]

(National Key Laboratory for Optoelectronic Integration, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 15 April 2013; revised manuscript received 7 May 2013)

Abstract

Silicon-based photonic integrated chips recently have attracted great attention and actively intervened in many applications such as optical communications, optical interconnects, and optical sensing for relevant research institutions. Photonic integrated circuits are the key block to build information infrastructures. Among of them, grating couplers play an important role in silicon photonics, due to high efficient optical coupling on/off photonic chips. Also, they have many advantages in high density photonic packaging and on-wafer testing, such as large alignment tolerances and no requirements for wafer scribing or chip polishing. This review focuses on the principles and performances of grating couplers on silicon-on-insulator substrates. In this article, we also discuss the state-of-art and the trends in the near future, with a summary of our achievements over the last few years.

Keywords: grating couplers, coupling efficiency, silicon-on-insulators, integrated optics

PACS: 42.79.Gn, 42.82.Et, 42.79.Dj

DOI: 10.7498/aps.62.184214

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB301701), the Main Direction Program of Knowledge Innovation of Chinese Academy of Sciences (Grant No. KG CX2-EW-102), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61107048, 61275065).

[†] Corresponding author. E-mail: yudeyu@semi.ac.cn