

# 基于二维光栅的四通道完全垂直光学接口

张赞允<sup>1,2</sup> 程 倩<sup>1</sup> 刘宏伟<sup>1,2</sup> 李鸿强

(1. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 西青 300387; 2. 天津工业大学  
天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 西青 300387)

**摘要** 作为单模光纤与硅基光电子芯片之间的光耦合接口, 光栅耦合器具有强对准容差能力、可随意放置以及晶圆级测试能力等一系列优点, 因此被广泛应用于硅基光耦合和光封装。然而为了减小二次反射, 传统光栅耦合器通常设计为具有一定光耦合倾角, 这个耦合倾角会给测试和封装带来不便。完全垂直光栅耦合器可以避免在光学封装中用到昂贵的角度抛光工艺, 这个优点使得它们在多核芯光纤和光纤阵列的耦合应用中非常具有吸引力。本文提出并实验验证了一种基于二维光栅和四通道波导设计的完全垂直光耦合接口, 器件仿真耦合效率最高可达 54%, 耦合中心波长在 1555 nm 附近, 向上的光反射损耗为 14% (-8.5 dB)。为了实验验证器件功能, 我们基于 CMOS 兼容工艺对器件进行了加工制造, 器件光学输入为四通道垂直耦合二维光栅, 通过两个 1×2 MMI 光学合束器将四个通道合为两输出通道并通过光栅耦合器输出。器件实验测试结果显示器件总耦合效率可达 40% (单端输出耦合损耗为 -7 dB), 同时我们还测试了具有臂长差的器件, 光谱呈现出较强的干涉波形, 这说明器件具有类马赫曾德干涉仪的性质, 有望在电光调制和光学滤波等领域获得应用。

**关键词** 光互连; 光子集成技术; 二维光栅耦合器

**中图分类号** TN256

**文献标识码** A

## 0 引言

随着光子集成技术和片上光互连技术的发展, 光互连的低功耗、高带宽、免电磁干扰等优势日益显现, 为突破芯片内电互连瓶颈和进一步提高芯片性能提供了有效的解决方案。硅基光电子工艺具有成熟廉价且与 CMOS 工艺相兼容的优点, 为硅基光电子器件的低成本制造和大规模生产创造了有利条件。近十几年来, 硅基光电子技术发展迅速, 研究重心逐步从分立器件走向大规模集成, 应用领域也在不断扩展。目前, 基于 SOI 衬底的硅基光电子平台支持各种功能器件在晶圆级芯片上集成<sup>[1-4]</sup>, 应用领域涵盖了数据通信<sup>[5]</sup>、光学传感<sup>[6]</sup>、光学相控阵<sup>[7]</sup>、量子通信<sup>[8]</sup>、人工智能<sup>[9]</sup>等。

在片上光子器件集成中, 硅基光栅耦合器作为硅基光波导与片外单模光纤的光耦合接口, 因其对准容差能力强、可随意放置、无需端面抛光以及晶圆级测试能力等优点, 在光耦合和光封装领域占据着越来越重要的位置<sup>[10]</sup>。然而遗憾的是, 为了减小寄生的二次反射, 传统光栅耦合器通常并非完全垂直的光耦合器件, 即光纤与芯片法线方向具有一定的耦合倾角。在器件实际应用中, 一定的光纤倾角无疑会带来很多不便。首先这意味着测试过程中光纤的角度调谐不可避免, 通常这个过程通常较为耗时; 其次, 要想实现光纤封装, 我们需要用到昂贵的角度抛光工艺, 这会显著增加封装成本。因此, 一个能够实现完全垂直耦合的高效率光栅耦合器<sup>[11-13]</sup>对于快速晶圆级测试和低成本光纤封装十分有利。

另一方面, 一维光栅耦合器是强烈偏振相关的器件, 由于双折射效应, 对于偏振态随机变化的输入光, 一维光栅耦合器无法稳定有效工作。为了实现偏振多样性的光耦合, 科学家们提出了二维光栅耦合器<sup>[14-16]</sup>。它

收稿日期: 2019-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(61675154); 天津市自然科学基金青年项目(18JCQNJC01800)资助

通讯作者: 张赞允, 男, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 半导体器件, E-mail: zhangzanyun@tjpu.edu.cn.

可以等效为两个相互正交的一维光栅耦合器在平面内的交叠,二维光栅耦合器可以同时实现偏振分束和偏振旋转的功能,这使得二维光栅可以将任意一个偏振态的光偏振分解并耦合进入单模波导的类 TE 模. 如此,相比一维光栅,二维光栅的总耦合效率对偏振态的依赖会明显减弱. 但是传统二维光栅耦合器通常也需要设计为具有一定的耦合倾角以降低二次反射. 这个倾角会使得 P 偏振光(电场平行于光栅对称轴)和 S 偏振光(电场垂直于光栅对称轴)的耦合光谱不一致,从而导致偏振相关损耗(PDL). 为了降低二维光栅耦合的 PDL,研究人员提出了很多技术方案,包括采用相移器补偿结构<sup>[17]</sup>、倾斜光栅阵列<sup>[18]</sup>、非对称光栅刻蚀图形<sup>[19]</sup>以及多层光栅耦合结构<sup>[20]</sup>等. 然而这些设计均是通过采用特殊结构来补偿倾斜耦合带来的双折射效应,而非改变倾斜耦合方式为垂直耦合以实现偏振无关工作.

文中我们设计并验证了一种基于二维光栅的完全垂直光栅耦合器,通过集成两个 MMI 合束器并通过两个光栅耦合器耦合输出,同时我们对二维光栅的光耦合性能进行了测试表征. 为了验证器件具有类似于马赫-曾德干涉仪的性质,我们还设计了一个非等臂光学结构的测试器件并测试了其归一化光传输谱. 测试结果显示器件最高耦合效率可达 40%,非等臂器件光传输谱呈现出较强的干涉波形,干涉谱消光比最高可达 33 dB. 这说明该二维光栅既可以实现完全垂直光耦合功能,也可以在光学滤波、电光调制等领域获得应用.

## 1 四通道二维光栅垂直耦合器仿真设计

图 1 所示为我们提出的面向完全垂直耦合应用的二维光栅耦合器,该器件由一个均匀二维光栅结构和四个锥形模斑转换器连接组成. 该器件设计和实现均基于 220 nm 顶层硅厚度、2  $\mu\text{m}$  埋氧层厚度的 SOI 晶圆. 众所周知,一个单模光纤可以携带两个互相正交的线偏振光,由于实际光纤的非完美性,总的光场为椭圆偏振态. 当光纤携带着随机偏振态的光垂直入射到该二维光栅耦合接口时,随机偏振态的光首先会被偏振分束成两个正交偏振态,随后通过光耦合、偏振旋转以及模斑转换之后分别进入四个光波导通道以 TE 模进行单模传输. 如图 1(b)所示,该二维光栅结构是由一个圆形刻蚀孔的二维阵列组成,两个方向上的光栅周期分别为  $\Lambda_x, \Lambda_y$ . 为了确保光栅在两个维度上具有对称性,两个周期被设计为相同值. 为了实现高效率完全垂直耦合,我们基于光栅理论和数值仿真对光栅周期  $\Lambda$ 、刻蚀深度  $d$ 、刻蚀孔直径  $D$  以及光栅周期数  $N$  等参数进行了优化设计.

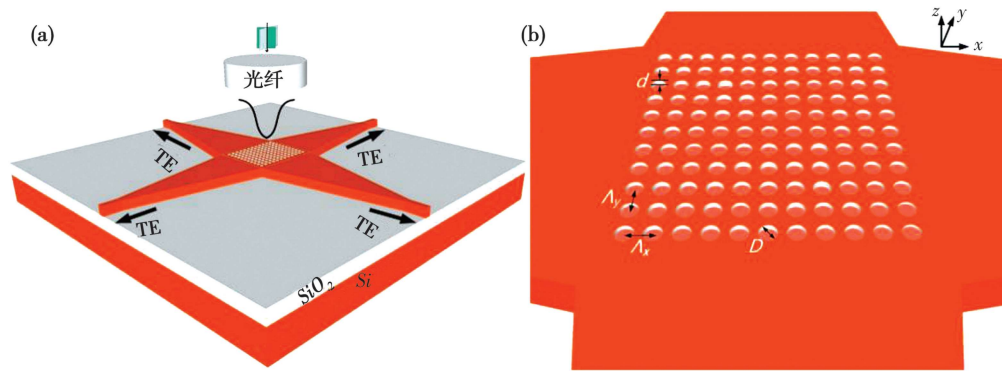


图 1 (a) 基于二维光栅的四通道完全垂直光栅耦合器结构示意图;(b) 光栅区域局部放大示意图

### 1.1 光栅结构设计

根据设计目标,我们要实现中心波长在 1550 nm 附近的完全垂直光耦合. 首先,我们基于光栅耦合的布拉格条件,二维光栅周期应该满足

$$\Lambda = \lambda / N_{effg}, \quad (1)$$

其中  $N_{effg}$  为二维光栅区域的等效折射率, $\lambda$  为光栅耦合中心处的真空波长. 因为直接求解  $N_{effg}$  比较困难,我们通过光学仿真软件 Lumerical Mode solutions 计算出 12  $\mu\text{m}$  宽波导的有效折射率约为 2.78 并作为设计参考. 如果用这个计算结果来取代  $N_{effg}$ ,我们计算出光栅周期应为 557 nm. 考虑到光栅区域实际有效折射率应小于计算值,那么实际的最佳光栅周期应大于 557 nm.

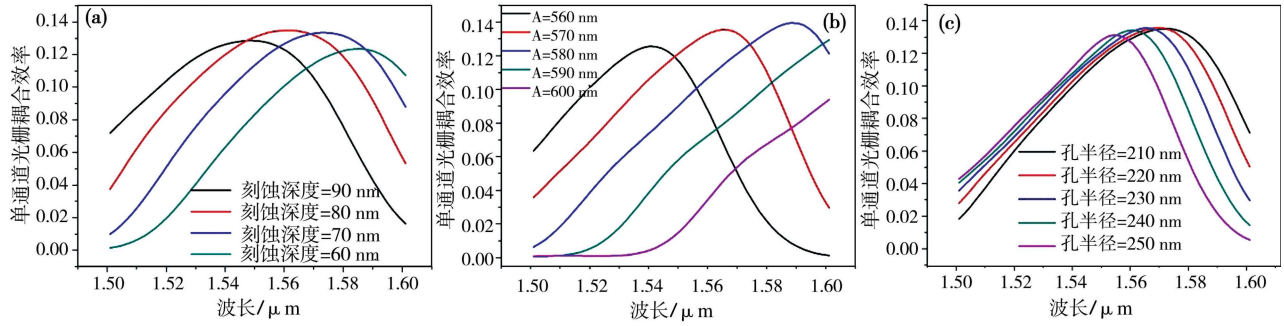


图2 二维光栅单通道耦合效率曲线(a);随着光栅刻蚀深度变化关系;(b) 随光栅周期变化关系;(c) 随光栅刻蚀孔半径变化关系

根据光栅耦合理论,光栅耦合效率  $CE$  可以表示为

$$CE = (1 - \rho) \cdot \Gamma \cdot \eta, \quad (2)$$

其中  $(1 - \rho)$  表示从波导注入到光栅区域的有效光功率 ( $\rho$  为波导/光栅界面的光反射系数),  $\Gamma$  为光栅的方向性, 定义为向上的光栅衍射功率与向上向下的衍射功率之和的比值,  $\eta$  为光栅衍射模场与单模光纤衍射场之间的模场匹配效率. 光栅刻蚀深度、光栅刻蚀孔半径、光栅周期等结构参数不仅会改变光栅区域有效折射率从而造成耦合效率曲线红移或者蓝移之外, 还会影响光栅方向性以及光栅耦合强度等, 从而影响光栅耦合效率大小. 鉴于此, 为了在 1550 nm 附近实现最强光耦合, 我们有必要对光栅结构进行深度优化. 我们采用时域有限差分算法 (FDTD) 进行了一系列数值计算和参数扫描, 在仿真中, 我们采用两个线性偏振态相互正交且相位差为  $\pi/2$  的高斯光源叠加以模拟实现一个圆偏振态的光纤入射光. 为了模拟单模光纤的模斑直径, 将高斯光束的束腰半径设置为  $5.2 \mu\text{m}$ . 图 2(a)-(c) 所示为我们仿真计算得到光栅刻蚀深度、光栅周期以及光栅刻蚀孔半径变化对二维光栅的单通道光耦合效率的影响. 在该仿真中, 我们对其中一个参数进行扫描时设置其余两个主要设计参数为固定值. 通过计算结果, 可以看出光栅耦合效率曲线会随着三个参数的变化发生光谱红移或者蓝移, 光谱移动是光栅区域有效折射率发生变化的结果. 在均匀光栅中, 刻蚀深度和刻蚀孔大小主要改变光栅的方向性  $\Gamma$  和光栅的耦合强度  $\alpha$ , 最终导致光栅耦合效率发生变化, 虽然耦合效率峰值大小相差不大. 因此, 为了对光栅进行性能优化, 我们应该将光栅在 1550 nm 波长处的光耦合效率作为优化目标, 通过多参数扫描得到最佳的结构参数组合. 为此, 我们分别将刻蚀孔半径和光栅周期以及刻蚀深度和光栅周期作为双参数进行扫描并计算出不同参数组合下的 1550 nm 处的光栅耦合效率, 计算结果如图 3(a) 和图 3(b) 所示. 为了节省仿真时间, 我们在参数扫描中采用了较低的网格精度. 从热图中可以看到当光栅周期为 565 nm、刻蚀孔半径为 220 nm 以及刻蚀深度为 90 nm 时光栅耦合效率达到最高. 为了与 193 nm 深紫外光刻工艺相兼容, 我们对光栅优化后的各参数最佳值进行了一定的折衷, 最终将设计参数设置为光栅周期为 570 nm、刻蚀孔半径为 210 nm 以及刻蚀深度为 80 nm.

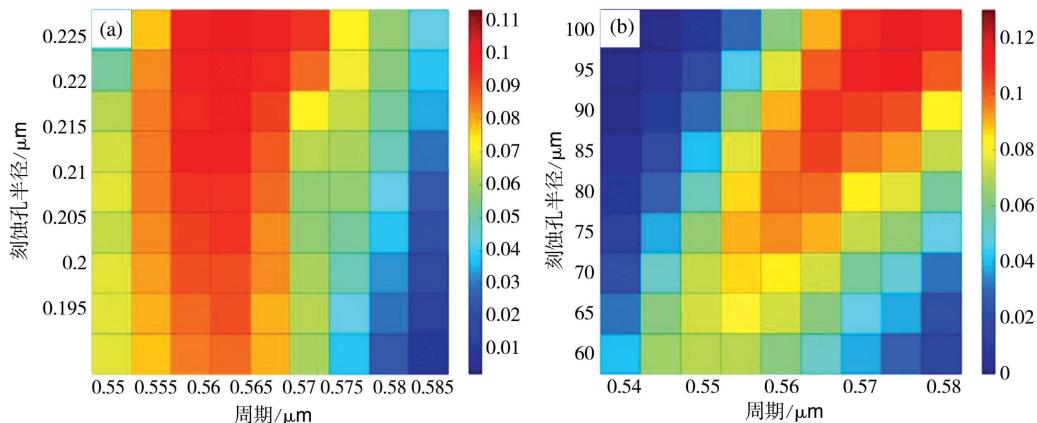


图3 (a) 计算得到刻蚀孔半径、光栅周期与光栅单通道耦合效率关系热图;(b) 计算得到刻蚀深度、光栅周期与光栅单通道耦合效率关系热图

## 1.2 光栅性能仿真

基于之前仿真优化设定的光栅结构参数, 我们采用更高精度的 FDTD 仿真对光栅进行了性能验证. 图 4

(a) 所示为我们计算得到的二维光栅耦合平面内光场强度分布图,可以看到在入射偏振态为圆偏振光时,二维光栅实现了光耦合和  $1 \times 4$  光分束的功能. 当光纤完美放置在光栅区域中心时,耦合进入四个通道光波导的光功率是均等的. 图 4(b) 所示为计算得到的二维光栅总耦合效率、向上的光反射以及向衬底的光泄漏曲线. 可以看到器件总耦合效率可达 54%, 中心波长在 1555 nm. 对于完全垂直耦合而言,光耦合损耗主要由两个部分组成,一部分为光纤入射时在光栅界面向上的光反射,另一部分为穿透光栅进入硅衬底的光功率,这里为了方便称为衬底光泄漏. 其中向上的光反射是回波损耗的来源同时也会在光纤内引起干涉,从而严重影响器件的性能. 因此,抑制向上的光反射对于完全垂直耦合光接口来说非常重要. 然而,我们可以看到该二维光栅器件的向上光反射功率在中心波长处约为 14%, 对应于  $-8.5$  dB. 相比之下,该器件的衬底光泄漏损耗相对较大,在中心波长处约为 30%, 而在波长  $1.56 \mu\text{m}$  之后迅速升高,这是因为光波长在远离光栅耦合中心波长后,逐渐不满足光栅耦合的相位匹配条件,光波导内的光耦合下降,大部分从光栅透射进入衬底. 通过引入衬底反射镜,光栅耦合效率有望得到大幅度提高.

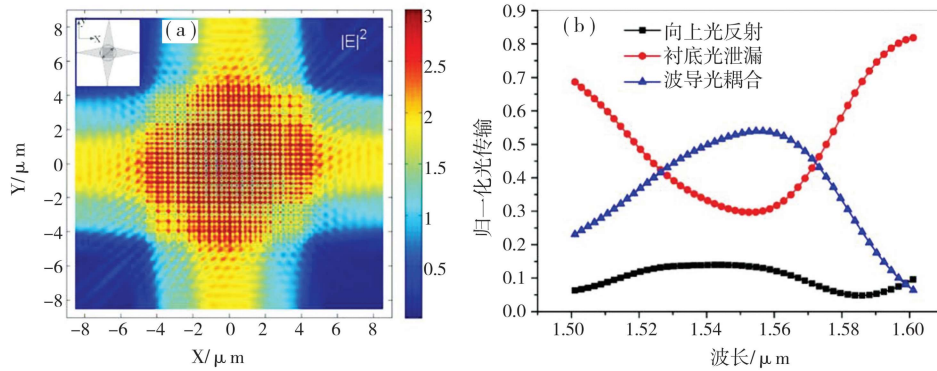


图 4 (a) 计算得到二维光栅耦合平面电场强度分布;(b) 计算得到二维光栅总耦合效率、向上的光反射以及向衬底的光泄漏曲线

## 2 结果讨论分析

为了对器件进行实验验证,我们采用该二维光栅结构作为光输入耦合器构建了一个集成光电子线路并通过 MPW 流片实现. 器件芯片照片如图 5 (a) 所示,我们采用两个 MMI 耦合器作为光合束器实现了两侧双波导的光学合束,并通过两个光栅耦合器耦合输出. 图 5 (b)、图 5 (c) 和图 5 (d) 分别为二维光栅、MMI 耦合器以及输出光栅耦合器的局部放大芯片照片. 芯片制造基于中国科学院微电子所的商用硅基光电子工艺,其主要工艺步骤如下所述:首先,基于 193 nm 深紫外光刻技术对光栅结构、光波导结构进行图形化并采用电感耦合等离子体刻蚀 (ICP) 对光栅和波导结构进行刻蚀. 为了简化制造工艺,芯片中光波导均采用脊型波导结构,两侧平板区域刻蚀深度与光栅刻蚀深度均为 80 nm. 此后,采用等离子体增强化学气相沉积工艺在芯片表面淀积  $1 \mu\text{m}$  二氧化硅作为上包层,同时也给器件提供保护. 为了实现单模光传输和模斑转换中的绝热光传输,芯片中单模光波导宽度和锥形模斑转换器长度分别设计为 450 nm 和  $300 \mu\text{m}$ .

为了验证测试器件的工作,我们首先基于 3-D FDTD 对测试器件进行了线路级仿真,整个光学传输包括光从二维光栅耦合进入芯片并通过模斑转换器、MMI 耦合器,仿真中我们采用的入射偏振态为线偏振光且偏振方向为光栅对角线方向. 在这种情况下,二维光栅将均匀地进行四通道光学分束,且两个相互正交波导方向上的光相位一致,因此两侧的光在 MMI 耦合器进行光学合束时会干涉增强. 图 5(a) 中插图为我们计算

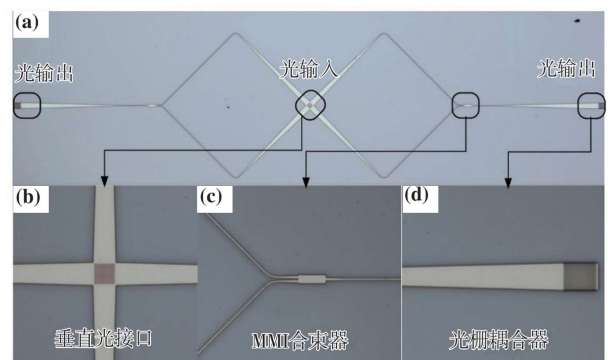


图 5 (a) 测试器件的芯片显微镜照片;(b) 二维光栅垂直耦合接口照片;(c) MMI 合束器照片;(d) 输出光栅耦合器照片

得到的测试器件在入射光由二维光栅垂直入射进入芯片后的光场分布平面图,可以看到器件在两侧分别形成了两个类马赫曾德干涉仪结构,当两侧的干涉仪结构均为等臂长时,两端 MMI 的光学输出在全波长范围内均为干涉增强后的高功率;当两侧干涉仪结构均存在一定臂长差时,两端 MMI 的光学输出谱便会呈现出强烈的干涉现象.

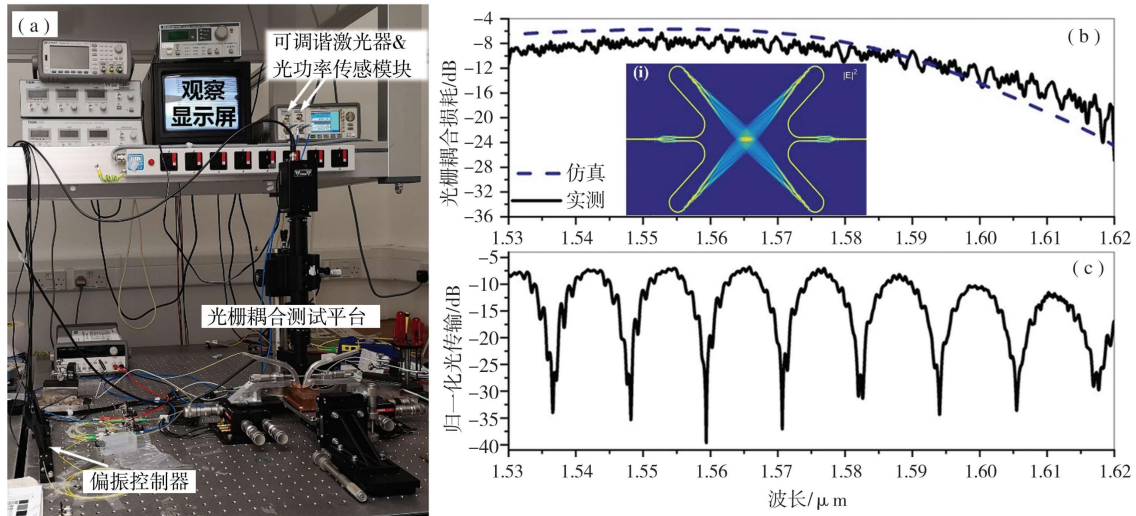


图 6 (a) 器件测试实验装置以及平台搭建实景照片;(b) 实验测得二维光栅单输出耦合效率曲线与仿真耦合效率曲线对比, 插图为基于 3-D FDTD 仿真计算得到的整个器件的光耦合和光传输光场分布图;

(c) 实验测得具有臂长差的测试器件归一化传输光谱

为了验证我们的仿真分析,我们对器件进行了测试表征,测试实验装置照片如图 6(a)所示.我们采用一个可调谐激光器作为光源,采用一个光功率测量模块进行光接收,两个模块均集成在测试仪器 Agilent lightwave multimeter B163B 中,接收端进行光电转换后经过处理连接到计算机并通过商用光学软件进行扫描控制和光谱显示.为了对入射光偏振态进行调谐,我们在前端光路中插入了一个偏振控制器,并采用一个临近的一维光栅耦合器来实现偏振态校准.在完成偏振态校准后,我们首先对等臂长的器件进行了测试,采用二维光栅进行光输入,通过两侧一维光栅耦合器进行光学输出.图 6(b) 所示为我们测试得到其中一个输出端口的归一化光学传输谱.为了得到二维光栅的耦合效率,这里我们去除了 MMI 耦合器和输出光栅耦合器的耦合损耗.从图中可以看到,实测得到二维光栅耦合效率与仿真计算结果较为吻合,实测最高耦合效率为  $-7$  dB,而仿真结果为  $-5.7$  dB.实测结果相比仿真结果有所降低,这可能是由于制造的不完美性以及实测中没有考虑去除的模斑转换器光损耗等原因.考虑到测试结果只是两个输出端口中其中一个的光学输出,因此测试结果并不能代表二维光栅的总耦合效率.假定光纤精确对准在光栅中心,根据光栅的对称性我们可估算出器件的总耦合效率为测试结果的两倍,即约为  $40\%$ .表 1 所示为本论文中二维光栅设计与已报道的其他二维光栅器件性能对比结果,可以看到该设计具有较高的耦合效率同时易于制造等优点.

我们还测试了另一个非等臂长的测试器件,也即两侧两个干涉仪均存在  $80 \mu\text{m}$  的臂长差,根据光学基本理论,干涉光谱的 FSR 应满足

$$\text{FSR} = \lambda_0^2 / N_{\text{eff}} \cdot \Delta L, \quad (3)$$

其中  $N_{\text{eff}}$  为器件中  $450 \text{ nm}$  宽单模脊型波导的有效折射率,  $\Delta L$  为光学臂长差.注意这里因为我们在测试中采用的是可调谐激光器扫描方式测得的器件光谱响应,因此公式中应该是单模波导的有效折射率而非群折射率.根据我们基于 Lumerical Mode solution 软件计算的结果,单模脊型波导的有效折射率  $N_{\text{eff}}$  约为  $2.53$ .设中心波长  $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ ,我们可以得到干涉光谱的 FSR 理论值应约为  $11.8 \text{ nm}$ ,这与图 6(c) 中  $11.3 \text{ nm}$  的实测结果较为吻合.可以看到干涉光谱呈现出与图 6(b) 中实测结果较为接近的包络,光谱最高干涉消光比可达  $33 \text{ dB}$ ,这显示出器件的二维光栅输入端在特定的偏振态下可作为较为理想的  $6 \text{ dB}$  分束器使用.基于器件具有类马赫-曾德干涉仪的性质,该二维光栅结构有望用于构建 MZI 型光学滤波器以及 MZI 型硅基光电调制器件等,在光学传感、数据通信等领域取得应用.

表 1 本设计与已报道的二维光栅耦合器主要性能参数对比

文献	年份	工作频带	耦合效率/dB		制造步骤数量		顶层硅厚度/nm	最小加工线宽/nm
			仿真	实测	刻蚀	淀积		
[18]	2016	C band	-4.4	-5.0	1	1	220	~200
[19]	2018	O band	-3.9	-3.9	1	1	200	-
[20]	2018	O band	-2.1	-4.8	3	2	200/450/450	300
本文	2019	C band	-2.7	-4.0	1	1	220	150

### 3 结论

我们设计并实验验证了一种基于二维光栅和四通道波导设计的完全垂直光栅耦合器. 为了对器件进行性能优化, 我们采用 FDTD 数值分析方法对光栅结构参数进行了一系列扫描优化, 最后基于双参数扫描得到了最佳光栅周期为 577 nm, 以及器件的其他优化参数组合. 同时为了满足 193 nm 深紫外光刻制造线宽要求, 我们对器件的设计参数进行了一定折衷, 最终将光栅周期、刻蚀孔半径、刻蚀深度分别设置为 570、210 和 80 nm. 为了对器件性能进行表征, 我们还基于二维光栅、MMI 耦合器以及一维光栅耦合器构建了集成器件. 通过测试集成器件光传输并归一化去除 MMI 耦合损耗和光栅耦合器损耗, 得到二维光栅的耦合效率约为 40%. 同时, 我们还设计并测试了一个具有臂长差的非等臂集成器件, 测试结果显示器件输出光谱呈现出强烈的干涉现象, 干涉消光比最高可达 33 dB. 这说明二维光栅在特定偏振态入射时可以在光耦合的同时作为 6 dB 分束器使用, 该二维光栅器件有望应用于光学滤波以及电光调制等领域.

### 参 考 文 献

- [1] 周培基, 李智勇, 俞育德, 等. 硅基光子集成研究进展[J]. 物理学报, 2014, 63(10): 1-8.
- [2] Romero-García Sebastian, Merget Florian, Zhong Frank, et al. Silicon nitride CMOS-compatible platform for integrated photonics applications at visible wavelengths[J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14036-14046.
- [3] Chen Hongda, Zhang Zan, Huang Beiju, et al. Progress in complementary metal-oxide-semiconductor silicon photonics and optoelectronic integrated circuits[J]. Journal of Semiconductors, 2015, 36(12): 121001.
- [4] 王军锋, 李跃进, 杨银堂. 光互连的研究与新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(1): 16-21.
- [5] Sun C, Wade M T, Lee Y, et al. Single-chip microprocessor that communicates directly using light[J]. Nature, 2015, 528: 534-538.
- [6] Mi G, Horvath C, Aktary M, et al. Silicon microring refractometric sensor for atmospheric CO<sub>2</sub> gas monitoring[J]. Opt Express, 2016, 24: 1773-1780.
- [7] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. Nature, 2013, 493: 195-199.
- [8] Qiang X, Zhou X, Wang J, et al. Large-scale silicon quantum photonics implementing arbitrary two-qubit processing[J]. Nature Photonics, 2018, 12: 534-539.
- [9] Shen Y, Harris N C, Skirlo S, et al. Deep learning with coherent nanophotonic circuits[J]. Nature Photonics, 2017, 11: 441-446.
- [10] 杨彪, 李智勇, 肖希, 等. 硅基光栅耦合器的研究进展[J]. 物理学报, 2013, 62(18): 184214.
- [11] 武华, 郭霞, 韩明夫. 高效垂直耦合的光栅耦合器设计[J]. 光子学报, 2013, 42(7): 777-781.
- [12] 张赞允, 朱华, 李鸿强. 高效率低向上反射的氮化硅光栅耦合器[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2018, 4: 31-36.
- [13] Zhang Z, Zhang Z, Huang B, et al. CMOS-compatible vertical grating coupler with quasi mach-zehnder characteristics[J]. IEEE Photonics Technol, Lett 2013, 25(3): 224-227.
- [14] Taillaert D, Chong Harold, Borel P I, et al. A compact two-dimensional grating coupler used as a polarization splitter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(9): 1249-1251.
- [15] Wohlfeil B, Rademacher G, Stamatiadis C, et al. A two-dimensional fiber grating coupler on SOI for mode division multiplexing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(11): 1241-1244.
- [16] Zou J, Yu Y, Zhang X. Single step etched two dimensional grating coupler based on the SOI platform[J]. Opt Express, 2015, 23: 32490-32495.
- [17] Halir R, Vermeulen D, Roelkens G. Reducing polarization-dependent loss of silicon-on-insulator fiber to chip grating couplers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(6): 389-391.

- [18] Zou J, Yu Y, Zhang X. Two-dimensional grating coupler with a low polarization dependent loss of 0.25 dB covering the C-band [J]. *Opt Lett*, 2016, 41: 4206-4209.
- [19] Sobu Y, Jeong S, Tanaka Y. Si-wire two-dimensional grating coupler with polarization-dependent loss of lower than 0.3 dB over a 60-nm-wide spectral range[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2018, 57: 112501-112508.
- [20] Mak J C C, Sacher W D, Ying H. Multi-layer silicon nitride-on-silicon polarization-independent grating couplers[J]. *Opt Express*, 2018, 26: 30623-30633.

## Four-Waveguide-Port Perfectly Vertical Optical Interface based on Two-dimensional Grating Structure

ZHANG Zan-yun<sup>1,2</sup> CHENG Qian<sup>1</sup> LIU Hong-wei<sup>1,2</sup> LI Hong-qiang<sup>1,2</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2. School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Key Laboratory of Photoelectric Detection Technology and System, Tianjin 300387, China)

**Abstract** As an optical coupling interface between the single-mode optical fibers and silicon photonic chips, grating couplers offer the advantages of large misalignment tolerance, flexibility in placement and wafer-scale testability. Therefore, it is widely used in silicon-based optical coupling and optical packaging. However, conventional grating couplers are usually designed to have a certain coupling angle of tilt to suppress the second-order back-reflection, which brings inconvenience to testing and packaging. Perfectly vertical grating couplers are very attractive in coupling with multi-core fibers and fiber arrays, because they can eliminate the need for costly angle polishing process in optical packaging. In this paper, a perfectly vertical optical interface based on two-dimensional grating and four-channel waveguide design is proposed and experimentally demonstrated. Around the center coupling wavelength of 1555 nm, the total coupling efficiency reaches 54% and the upward optical reflection is 14% (−8.5 dB). To experimentally demonstrate the device functionality, We fabricate the device with CMOS-compatible process. The four-channel two-dimensional grating coupler is used as the optical input of the test device, and four waveguide channels are optically combined into two output channels through two 1×2 MMI couplers and then output coupled by two grating couplers. The experimental results show that the total coupling efficiency of the two-dimensional coupler can reach 40% (single-ended output coupling loss is −7 dB). we also tested the device with arm length difference, the optical spectrum shows strong interference patterns, which indicates that the device has the characteristics similar to a Mach-Zehnder interferometer and is expected to find applications in the fields of electro-optic modulation and optical filtering.

**Key words** optical interconnection; photonic integration technology; two-dimensional grating coupler