

# 硅光子模斑转换器的研究进展

胡娟, 林欢, 汪维军, 陈华, 方青

昆明理工大学理学院, 云南 昆明 650500

**摘要** 硅光子模斑转换器是硅光子集成芯片与外部光纤连接的关键器件,在集成光路中起着至关重要的作用。标准光纤的模斑尺寸与纳米光子波导的模斑尺寸不匹配,导致标准光纤与纳米级硅波导直接对接时存在很大的耦合损耗,而硅光子模斑转换器能够显著减小它们之间的光损耗。硅光子模斑转换器的一端具有较大的模斑尺寸,与标准光纤的模斑尺寸相匹配;其另一端具有较小的模斑尺寸,与纳米硅光子波导的模斑尺寸相匹配,因此能够显著减小标准光纤与纳米硅光子波导之间的光连接损耗。综述了不同结构转换器的特点,对不同类型的转换器在结构、性能以及应用上的优缺点进行了比较与分析,对硅光子模斑转换器的前景进行了展望,并提出一些看法。

**关键词** 集成光学; 硅光子模斑转换器; 光栅耦合器; 锥形模斑转换器; 双波导转换器; 悬臂转换器

中图分类号 TN622

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.030003

## Research Progress of Silicon Photonic Mode Size Converters

Hu Juan, Lin Huan, Wang Weijun, Chen Hua, Fang Qing

Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China

**Abstract** Silicon photonic mode size converter is the key device for silicon based photonic integrated chip to connect with external optical fiber, it plays an important role in integrated optical path. The mode size of the standard fibers does not match the mode size of the nanometer photonic waveguide, so there is a great coupling loss between the standard fiber and the nanometer silicon waveguide, the silicon photonic mode size converters can significantly reduce the optical loss between them. One end of the silicon based photonic mode size converter has a large mode size that matches with the mode size of the standard fiber; the other end has a smaller mode size, which can be matched with the mode size of nano-silicon photonic waveguide, thereby significantly reducing the optical connection loss between the standard fiber and the nano-silicon photonic waveguide. The characteristics of different structures of converters are reviewed, while the advantages and disadvantages of different types of converters in structure, performance and application are compared and analyzed, and the prospect of silicon photonic mode size converters is prospected and some opinions are put forward.

**Key words** integrated optics; silicon photonic mode size converters; grating coupler; tapered mode size converter; dual waveguide converter; cantilever converter

**OCIS codes** 130.3120; 130.0250; 130.2790

## 1 引言

20世纪60年代以来,光电子集成电路的发展较为迅速。通过国内外研究人员的努力,硅光子器件在无源器件和有源器件方面都取得了巨大成就。基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构的硅基调制器

已经实现了高于50 Gbit/s的调制速度<sup>[1]</sup>;基于PIN垂直结构的GeSi探测器能够完成高于60 Gbit/s的探测效率<sup>[2]</sup>;基于阵列波导光栅(AWG)接收器的接收速率超过320 Gbit/s<sup>[3]</sup>;悬桥结构的硅基开关能够实现低于0.5 mW的功耗<sup>[4]</sup>。硅光子模斑转换器作为硅光子集成器件与外部光纤连接的重要器件,

收稿日期: 2017-08-23; 收到修改稿日期: 2017-09-17

基金项目: 地区科学基金(61764008)、国家自然科学基金面上项目(61674072)、国家自然科学基金(51304097)

作者简介: 胡娟(1993—),女,硕士研究生,主要从事硅基光波导耦合器方面的研究。E-mail: 2905121687@qq.com

导师简介: 方青(1977—),男,博士,教授,主要从事硅光子集成器件方面的研究。

E-mail: qingfang@kmust.edu.cn(通信联系人)

一直是硅光子研究的热门领域,同时也是研究难点。

硅的折射率较大,以硅为芯层的光波导器件的尺寸非常小,与单模光纤相比,相差 2 个数量级,光波导器件与单模光纤直接对接耦合时存在很大的模式失配损耗(-25 dB)。由于对准公差小,将硅光子器件与单模光纤一起封装时,损耗进一步增大。硅光子模斑转换器作为硅光子集成芯片与外部光纤连接的重要器件,能够将来自单模光纤的光信号经传输后以较大的耦合效率以及较低的相关损耗耦合到尺寸较小的硅基光波导器件中。国内外研究人员已经报道了各种结构类型的硅光子模斑转换器。为进一步了解硅光子模斑转换器的研究现状以及发展趋势,本文综述了不同结构转换器的性能以及优缺点。

## 2 硅光子模斑转换器的研究背景

从第一支晶体管制成以来,晶体管逐渐取代了电子管。然而随着集成电路越来越小,一块芯片上的器件数量激增,芯片上的硅波导结构也要求随之小型化,但现有的体硅材料及工艺正在接近它们的物理极限,在进一步减小集成电路特征尺寸方面遇到了严峻挑战。一方面,基于硅平台的电子器件逐步进入纳米时代,器件的尺寸大大减小;另一方面,基于二氧化硅材料的光通信器件因折射率较低而使得器件的尺寸较大,同时有源光器件和无源光器件难以在二氧化硅平台上进行光电子集成,这些都限制了二氧化硅光电子器件的进一步发展。若要进一步提高芯片的集成度和运行速度,就需要引入高折射率差的导波层和限制层来减小器件的尺寸。

硅具有较大的折射率,以硅为芯层的硅光子波导具有超小的器件尺寸;在通信波段,硅是一种透明材料,硅光子波导具有很小的光传输损耗;硅材料具有很好的热光效应和等离子效应,能够用来制作低功耗的高速光电子器件,如调制器、光开关等;锗材料能够在单晶硅上生长,硅光子集成器件的制作工艺与互补金属氧化物半导体(CMOS)的制备工艺兼容,这些优点促使硅光子集成器件在近 10 年快速发展,并取得了巨大成就,为硅光子集成器件的广泛应用打下了基础。

近年来,基于纳米光子器件的硅波导吸引了众多研究者的关注,硅光子学作为开发大规模光子集成电路(PIC)和下一代光通信的平台显示出巨大潜力,它为构建一个高度集成的电路提供了可能,而且 SOI(silicon-on-insulator)材料中的硅和二氧化硅的折射率相差(约为 2)较大,因此,基于 SOI 材料上硅

光子器件的波导尺寸可以大大降低(几百纳米),使得高密度 PIC 得以实现,并且可以用发展较为成熟的制备 CMOS 的标准工艺来制备。如此高密度的芯片上的器件与外部光纤进行信息转换时,会存在很大干扰,导致信号不稳。器件越来越小,从而需要一种转换器将外部器件上的信号与芯片上极小元件的信号进行高效率、低损耗的转换。

## 3 硅光子模斑转换器的结构类型及研究进展

### 3.1 光栅耦合器

#### 3.1.1 光栅耦合器的基本原理

光栅耦合器通过光栅的衍射作用将来自单模光纤的光耦合到硅基光波导上,但并不是所有的入射光经过光栅的衍射后都可以耦合到波导中,只有满足布拉格条件的光才能有效地耦合进波导,或者从波导耦合出去。其必须满足的布拉格条件为

$$k_0 \sin \alpha + m \frac{2\pi}{\Lambda} = \beta, \quad (1)$$

式中  $k_0 = (2\pi/\lambda)n_0$  为空气中的光传播常数; $\alpha$  为入射光偏移光栅平面法线的角度; $m$  为衍射级次,为了实现最大强度的衍射光,一般取  $m = 1$ ,即利用光栅的一阶衍射; $\Lambda$  为光栅周期; $\beta = (2\pi/\lambda_0)n_{\text{eff}}$  为模场在光栅结构中以折射率  $n_{\text{eff}}$  传播的传播常数。

经过光栅的衍射作用后,入射光的功率被分成三个主要部分:向上反射的功率、通过衬底向下泄漏的功率以及耦合到波导中的功率<sup>[5]</sup>。因此限制光栅耦合器效率的因素主要有两个:1) 方向性。传统光栅耦合器的方向性比较差,通过衬底泄漏的光功率通常为 35%~45%<sup>[6]</sup>。为防止能量从衬底泄漏,Zaoui 等<sup>[7]</sup>在光栅底部增加了金属反射镜,实验得到的耦合损耗为 -1.6 dB,1-dB 带宽为 48 nm。2) 来自波导光栅衍射的光场模式与单模光纤光场的模式不匹配。对于均匀光栅耦合器来说,周期和占空比是恒定的,均匀光栅散射模式的形状可以近似地被视为指数型,而单模光纤的模式是高斯型的,因此单模光纤的模式与均匀光栅耦合器散射的模式不匹配,失配损耗通常大于 1 dB<sup>[5]</sup>。通过对光栅结构浅层刻蚀以及逐渐改变占空比,可使从 SOI 光栅结构衍射输出的光场形状服从高斯分布,从而使波导光栅衍射的光场与单模光纤的光场相匹配<sup>[8-9]</sup>。

#### 3.1.2 光栅耦合器的种类

2013 年,Zaoui 等<sup>[10]</sup>将光栅结构改为非周期型,使衍射光场呈高斯型,从而与标准光纤的模场相匹

配,进一步减小耦合损耗,耦合损耗低至 $-0.64$  dB,1-dB带宽为44 nm。2014年,Kunze等<sup>[11]</sup>采用COMS工艺在SOI晶片上制备了均匀和非均匀的两种光栅耦合器,非均匀光栅的扫描电镜图如图1所示,测量得到均匀和非均匀光栅耦合器的耦合损耗分别为 $-1.08$  dB和 $-0.62$  dB,1-dB带宽为40 nm。

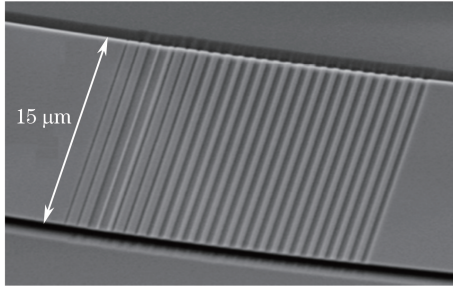


图1 非均匀光栅的扫描电镜图

Fig. 1 Picture of nonuniform grating obtained by scanning electron microscopy

2002年,Ghent大学制作了垂直光栅耦合器<sup>[12]</sup>,该耦合器实现了单模光纤与GaAs-AlO<sub>x</sub>波导之间的垂直耦合,不仅可以采用标准的制作工艺,而且制作方法简单。2011年,Yamada等<sup>[13]</sup>制作了双向垂直光栅耦合器,用它将来自单模光纤的光向两边传播,耦合损耗进一步减小,但需在底部增加反射镜,加大了制作的难度。2016年,Wang等<sup>[14]</sup>制作了双向垂直光栅耦合器,其结构如图2所示,实验测得3-dB带宽高达104 nm,对于横电模(TE模)而言,耦合损耗为 $-3.9$  dB。该类型耦合器的主要损耗来自Y型分支处的相位失配,通过使用更长的锥形结构,并应用相位调谐可以减小相位失配,提高性能<sup>[15]</sup>。Zhang等<sup>[16]</sup>提出的光折变长周期波导光栅耦合器的耦合效率较高,且具有低串扰和高温下稳定的特点。

光电子器件的背反射最小化对于高频调制性能来说是非常重要的。背反射主要来源于两个方面:

1) 光栅耦合器的二阶反射;2) 输入波导与光栅耦

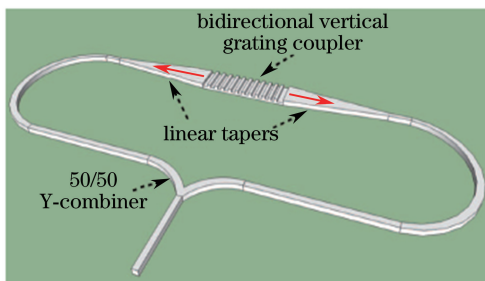


图2 双向垂直光栅耦合器

Fig. 2 Bidirectional vertical grating coupler

合器的边缘产生的菲涅耳反射。

对于二阶反射,可以利用在光纤与光电子集成电路表面设置大约 $10^\circ$ 的倾斜耦合角度来抑制,但在实际应用过程中受到了一定限制,而且封装也比较困难<sup>[17]</sup>。而二元闪耀光栅<sup>[18-19]</sup>对于消除二阶反射来说是一个较好的选择。闪耀光栅可以将所有衍射光“闪耀”成单个衍射级,抑制第二级和高级次衍射,并可提高光栅的效率和方向性。其他类型的闪耀光栅,例如三角光栅和平行四边形光栅,不能用标准刻蚀工艺制造。二元闪耀光栅由均匀高度的可变量子波长柱组成,它是闪耀光栅的三角形齿形的二进制形式,并且可以在一个刻蚀步骤中制造。制备的方法与成熟的CMOS技术相融合可使批量生产成为可能。Yu等<sup>[20]</sup>报道的二元闪耀光栅的耦合损耗为 $-0.8$  dB,3-dB带宽为65 nm,入射角容差可达到 $11.5^\circ$ 。在2011年,Yang等<sup>[21]</sup>报道了亚波长双闪耀光栅耦合器,它利用不对称结构实现了完全垂直的光纤的耦合,计算的耦合损耗在 $1.55$   $\mu\text{m}$ 处为 $-1.8$  dB,1-dB带宽可达到80 nm。如果增加布拉格反射层,损耗能够达到 $-0.97$  dB左右。该结构的制备技术与CMOS技术兼容,可以通过一步刻蚀得到,但制作容差较大。2014年,Kunze等<sup>[11]</sup>提出了一种桥接光纤和硅光子集成电路之间间隙的光栅耦合器,测量得到的耦合损耗为 $-1.08$  dB。

聚焦式光栅耦合器不仅可以减小耦合器的占用面积,还能将反射回来的光重新对焦,使光远离输入波导。Na等<sup>[22]</sup>制备的光栅耦合器将脊形波导中的模式绝热地耦合到平板波导中,在1310 nm处的背反射为 $-27$  dB。多伦多大学的Sacher等<sup>[23]</sup>在2014年报道了双层光栅结构的聚焦式耦合器,该结构是在光栅的上面再覆盖一层Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>光栅结构,测量得到的耦合损耗为 $-1.3$  dB,1-dB带宽为80 nm。同年,Song等<sup>[24]</sup>制备了如图3所示的聚焦式光栅耦合器结构,扇形波导由晶体硅组成,聚焦式圆形光

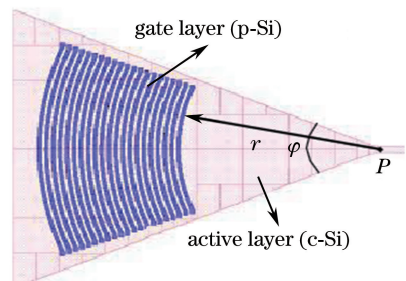


图3 聚焦式光栅耦合器

Fig. 3 Focusing grating coupler

栅结构由多晶硅结构组成,在晶体硅与多晶硅之间多了一层氧化层。与单层光栅结构相比,聚焦式光栅耦合器结构的耦合效率提高了2~3倍,但仍然较低,在 $1.3\ \mu\text{m}$ 处为 $-2.8\ \text{dB}$ ,在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处为 $-3.8\ \text{dB}$ 。2014年,新加坡微电子研究所的Zhang等<sup>[25]</sup>在氮化硅平台上通过一步反应离子刻蚀以及深紫外光刻制备了底部加入两个周期的分布式布拉格反射镜光栅结构,该结构的耦合损耗为 $-2.6\ \text{dB}$ ,1-dB带宽为 $53\ \text{nm}$ 。2016年,Zhao等<sup>[26]</sup>用电子束光刻制作了光栅和反向锥形结合的耦合器,结构如图4所示,光栅部分由 $700\ \text{nm}$ 的氮化硅波导组成,耦合损耗为 $-3.7\ \text{dB}$ ,1-dB带宽为 $54\ \text{nm}$ 。由于扇形结构上刻蚀的大部分是对称的,存在很大的菲涅耳反射,测量的背反射通常在 $-20\ \text{dB}$ 左右<sup>[26-29]</sup>。为了减小这种反射,光栅的沟槽需要不对称地刻蚀。

2017年,Song等<sup>[30]</sup>报道了聚焦式非对称刻蚀结构的耦合器,结构如图5所示,角度 $\phi$ 大于 $4^\circ$ 时,该耦合器的耦合损耗为 $-0.3\ \text{dB}$ ,1-dB带宽的背反射为 $-44\ \text{dB}$ 。

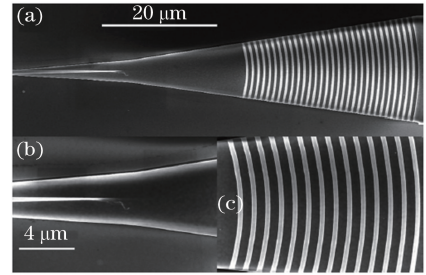


图4 (a)  $\text{Si}_3\text{N}_4$  光栅耦合器的扫描电镜图;  
(b) 反向锥形;(c) 光栅区域

Fig. 4 Images of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  grating coupler obtained by scanning electron microscopy; (b) inverse taper tip; (c) grating region

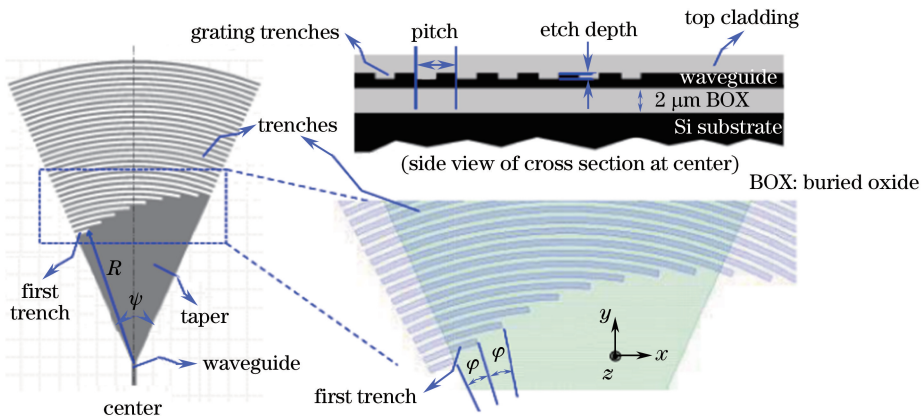


图5 聚焦式非对称刻蚀的光栅耦合器

Fig. 5 Focused asymmetric etched grating coupler

### 3.2 悬臂转换器

在底部增加反射镜可以减少衬底泄漏,但制作较为困难。悬臂结构可以减小模式的泄漏<sup>[31-33]</sup>,Fang等<sup>[34]</sup>用化学气相沉积和深紫外光刻等方法制作了悬臂型转换器,该转换器与劈型光纤耦合的一端的横截面尺寸为 $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ ,转换器与劈型光纤之间存在轻微的模尺寸失配。在入射光波长为 $1520\sim 1600\ \text{nm}$ 时,该转换器与透镜光纤耦合,对于TE模,测量的耦合损耗为 $1.7\sim 2.0\ \text{dB}$ ;对于横磁模(TM模),测量的耦合损耗为 $2.0\sim 2.4\ \text{dB}$ ,产生1-dB额外损耗的对准容差在 $x$ 和 $y$ 方向上都是 $\pm 1.7\ \mu\text{m}$ 。随后,贝尔实验室制备了类似的转换器<sup>[35]</sup>,结构如图6所示。测量得到其与 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 波导的耦合损耗为 $-0.7\ \text{dB}$ ,在 $1480\sim 1580\ \text{nm}$ 之间的偏振相关损耗为 $-0.2\ \text{dB}$ ,波长相关损耗为 $-0.4\ \text{dB}$ 。

2011年,Fang等<sup>[36]</sup>通过优化之前的结构,制作了基于a-Si波导的悬臂转换器,该转换器对于TE模和TM模的1-dB带宽都大于 $120\ \text{nm}$ ,产生1-dB额外损耗的对准容差对于TE模和TM模在 $x$ 和 $y$ 方向上分别为 $\pm 2.8\ \mu\text{m}$ 和 $\pm 2.1\ \mu\text{m}$ 。Jia等<sup>[37]</sup>结合反向锥形和悬臂结构,用折射率为1.5的氮化硅作为中间材料,使得单模光纤和高折射率的波导相匹配,以减小失配损耗,对结构尺寸的依赖性也相对减小,在 $x$ 和 $y$ 轴上的对准公差均为 $\pm 3.5\ \mu\text{m}$ ,偏振相关损耗小于 $-0.5\ \text{dB}$ ,但是与透镜单模光纤耦合时的效率较低。2015年,Barwicz等<sup>[38]</sup>制备了O波段超材料耦合器,实现了标准单模光纤与硅纳米波导之间 $-1.3\ \text{dB}$ 的传输损耗,在波长为 $1310\ \text{nm}$ 处,100 nm光谱范围内的偏振相关损耗为 $-0.6\ \text{dB}$ 。然而,这种悬臂型转换器的长度约为 $875\ \mu\text{m}$ ,这对硅光子器件来说是相当长的。

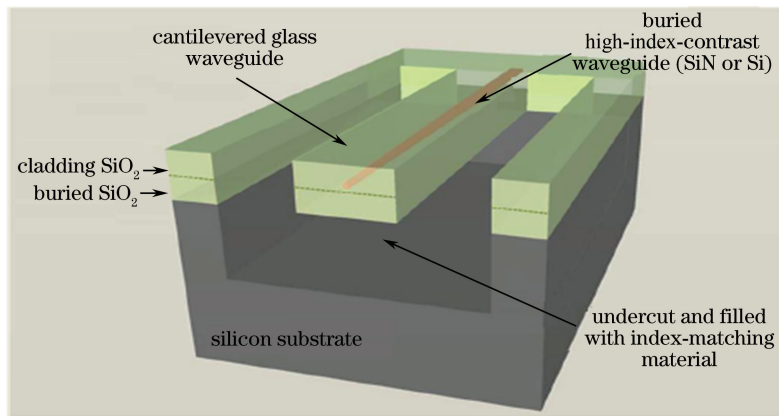


图6 具有悬臂波导与折射率匹配包层的光纤转换器

Fig. 6 Fiber converter with cantilevered waveguide and index-matched cladding

2016年,本课题组制作了具有3D锥形功能的悬臂型模斑转换器<sup>[39]</sup>,如图7(a)所示。悬臂结构的使用有效地防止了扩展模式泄漏到衬底。二氧化硅梁的设计用于支撑芯体结构,并且对耦合效率没有影响。图7(b)中的白色区域表明衬底硅与二氧化硅波导连接,模式会因此而泄漏到衬底,图7(c)显示SiO<sub>2</sub>波导结构在悬臂横梁作用下完

全悬空。这种悬臂型模斑转换器具有低耦合损耗、波长不相关、带宽较宽等优良的性能。通过实验测量得到TE模的最低耦合损耗为-1.5 dB, TM模的最低耦合损耗为-2.1 dB。对于TE模和TM模,1-dB带宽都大于100 nm,产生1-dB额外损耗的对准公差在 $x$ 和 $y$ 方向分别为 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ 和 $\pm 2.0 \mu\text{m}$ 。

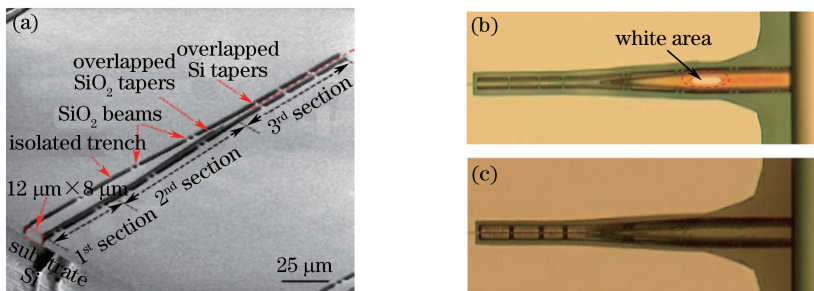


图7 (a)悬臂波导转换器的扫描电镜图像(点线表示第三部分埋在二氧化硅悬臂波导中的硅重叠锥形);

(b)非完全悬臂结构的光学显微镜图像;(c)完全悬臂结构的光学显微镜图像

Fig. 7 (a) Image of cantilevered fiber-to-waveguide converter obtained by scanning electron microscopy

(dot line represents Si overlapped tapers buried in SiO<sub>2</sub> cantilevered waveguide in the 3<sup>rd</sup> section);

(b) image of non-completely cantilevered structure obtained by optical microscopy;

(c) image of completely cantilevered structure obtained by optical microscopy

### 3.3 锥形转换器

锥形转换器是一种最直观的转换器,从单模光纤出射的光经锥形转换器传输后,模场尺寸压缩到与纳米波导的尺寸相匹配。2016年,Shiraishi等<sup>[40]</sup>在之前报道的结构<sup>[41]</sup>的基础上通过反应离子刻蚀加入一个薄平板波导,该结构不需要对垂直向下锥度的厚度进行严格控制,但其耦合效率仍比较低,且偏振敏感性较高。锥形转换器急剧变化的宽度会引起一个短线性锥度末端的散射损耗,通过逐步优化每段的参数,可以在很大程度上消除这种散射损耗。

Liu等<sup>[42]</sup>提出的楔形光纤和基于二维模斑转换器的多量子阱平面光波光路芯片实现了光场的高效耦合。Zou等<sup>[43]</sup>将锥形波导逐段优化,制备了短而高效的转换器,该结构的测试图如图8(a)所示。在图8(c)中可以看到该锥形并不是平滑的渐缩,每一段都是经过优化之后得到的,在波长为1530~1540 nm处测量得到的耦合损耗为-0.56 dB。该结构的耦合效率是相同长度线性锥形的三倍。

2002年,Shoji等<sup>[44]</sup>在锥形结构上覆盖了一层多聚物波导,将其作为光纤与硅波导之间的物质,折

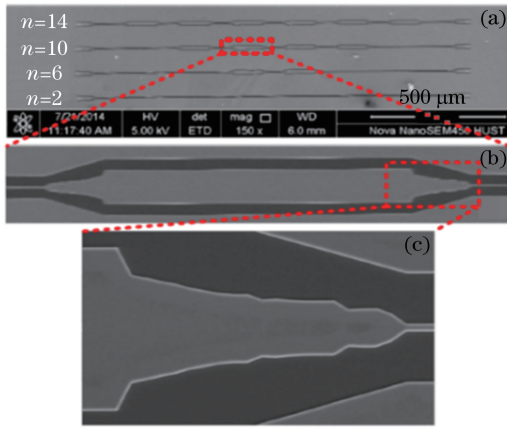


图8 转换器的扫描电镜照片<sup>[43]</sup>。(a)整体视图；  
(b)放大级联转换器；(c)放大单转换器

Fig. 8 Pictures of converters obtained by scanning electron microscopy<sup>[43]</sup>. (a) Overall view; (b) zoom-in cascaded converters; (c) zoom-in single converter

射率可以在 1.5~2 之间变化,实验测得的耦合损耗为 -0.8 dB。2010 年, Pu 等<sup>[45]</sup>在聚合物波导与反向锥形硅波导之间加入二氧化硅薄膜,不但减少了聚合物 N—H 键对硅波导中能量的吸收,而且防止了硅波导被等离子体刻蚀或损坏。Takei 等<sup>[46]</sup>提出用 knife-edge 锥形代替硅波导尖端锥形结构。与传统的锥形结构相比, knife-edge 锥形结构在宽度和高度上都逐渐向顶端减小,由于其长宽比相对较低,因此锥形尖端较为坚固,制作过程中不易损伤锥形结构。2015 年, Maegami 等<sup>[47]</sup>制备的具有二氧化硅间隔的双波导转换器中用到了 knife-edge 锥形结构,如图9所示,实验测得的 TE 模和 TM 模的耦合

损耗都是 -1.5 dB,在 C 波段和 L 波段区域的波长相关性较小。

3D 锥形转换器能够在垂直方向上有效地将纳米波导的模式展宽。与拉锥光纤类似的 3D 锥形转换器,能够将模斑的大小在水平、垂直方向上同时压缩<sup>[48-52]</sup>。2011 年, Liao 等<sup>[50]</sup>用光刻法制备了如图 10 所示的转换器,该 3D 锥形转换器由 SU8 材料组成,耦合损耗为 -3 dB,未对准公差在  $x$  方向和  $y$  方向上分别为  $3.5 \mu\text{m}$  和  $3\sim 5 \mu\text{m}$ 。2013 年, Liao 等<sup>[50]</sup>通过优化该结构,使耦合效率提高,但偏振相关损耗仍比较大。

为了说明近年来硅光子模斑转换器的发展情况,表 1 给出了几种典型硅光子模斑转换器的性能。

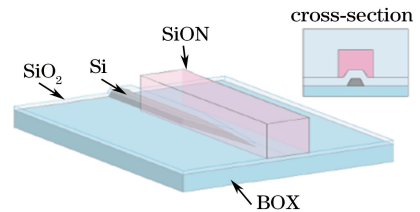


图9 具有二氧化硅间隔物的模斑转换器

Fig. 9 Spot size converter with silicon dioxide spacer

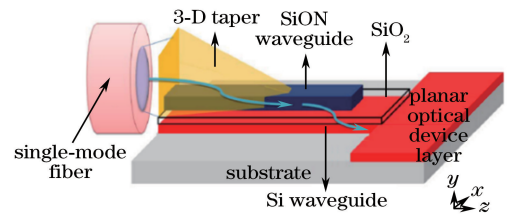


图10 3-D 锥形转换器示意图

Fig. 10 Schematic of 3-D tapered converter

表1 硅光子模斑转换器性能比较

Table 1 Comparison of performance of silicon photonic mode size converters

Coupler type	Coupling loss with single mode fiber /dB	Reliability	Polarization characteristics	Reference
Nonuniform grating coupler	-0.62 (TE)	Excellent	Related	[11]
Bidirectional vertical grating coupler	-3.9 (TE)	Good	Related	[14]
Focusing grating coupler	-2.8 (TE)	Good	Related	[24]
Focused asymmetric etched grating coupler	-0.3 (TE)	Excellent	Related	[30]
Cantilevered fiber-to-waveguide converter	-1.5 (TE)	Good	Not related	[39]
Horizontal up-and vertical down-tapers followed by a thin slab-waveguide	-2.1 (TM)	Good	Not related	[39]
	-2.6 (TE)	Good	Related	[40]
	-3.4 (TM)			

## 4 硅光子模斑转换器的制备

硅光子模斑转换器的制备技术与其他硅基光电

子器件的制备技术一样,主要有电子束曝光、深紫外光刻、气相沉积以及刻蚀等,对精度以及工艺的要求非常高,工艺误差很可能会导致实验结果与模拟数

据之间出现很大差别。

硅光子模斑转换器的制备过程为:首先,将硅片清洗烘烤干净;然后用制备薄膜的方法将所需介质沉积在硅片上,沉积方法主要有物理气相沉积法和化学气相沉积法,物理气相沉积一般适用于金属薄膜的生长,绝缘体或半导体薄膜的生长一般采用化学气相沉积法;接下来,利用紫外光刻或电子束曝光的方法将预制在掩模板上的图案转移到表面的光刻胶薄层上,

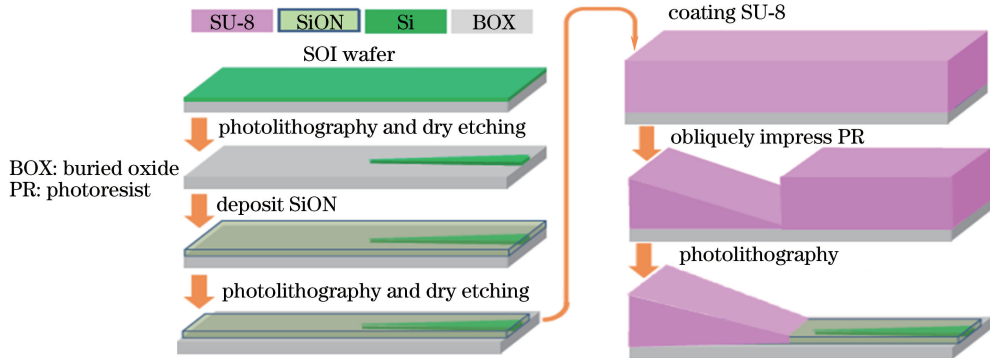


图 11 3-D 锥形转换器的一般制作步骤

Fig. 11 General production steps of 3-D tapered converter

## 5 结束语

光栅耦合器是目前最常见的一种将硅光子器件与光纤耦合的器件。在芯片设计上,光栅耦合器可以放置在芯片的任何位置,使得集成器件的整体设计更加方便,而且芯片不需要划片以及端面抛光,避免了因划片和抛光引起的波导端面损伤,有较大的对准容差以及高耦合效率。但是光栅的色散工作原理造成了器件的有效谱宽较窄,限制了其在密集波分复用(WDM)器件上的广泛应用。光栅耦合器的偏振敏感性较高,难以同时在 TE 和 TM 模式下有效工作。

悬臂转换器是在 2010 年左右开始出现的一种较新型的耦合器件,该器件具有低的耦合损耗、宽的工作谱宽、偏振不敏感、大的耦合容差等较好的光学性能,适合在所有功能芯片上使用;目前该器件还未有效地解决与光纤的封装问题,限制了其在商用芯片上的使用。

锥形模斑转换器是较早提出的一种硅光子波导与光纤耦合的器件,该器件与锥形光纤耦合时具有较好的耦合效率和低的偏振损耗;但该器件与光纤的耦合容差较小,与平头光纤耦合时的光学性能较差,难以在商用芯片上广泛应用。

在未来商用硅光子器件中,光栅耦合器与悬臂

紫外光刻的速度快,因此精度很难控制,波导器件对工艺的要求很高,所以一般会选用电子束曝光,虽然速度慢,但精度高,将图案转移到材料中的过程一般会用到干法刻蚀和湿法刻蚀,湿法刻蚀是纯化学反应过程,成本较高,现在用的主要刻蚀方法一般是干法刻蚀中的物理和化学相结合的刻蚀方法,具有较好的方向性和选择性,而且速度也大大加快。以 3D 锥形转换器为例说明简要的制备步骤,如图 11 所示。

耦合器因与平头光纤耦合时具有较好的光学性能和较低的封装成本而具有更好的应用前景。完全解决悬臂耦合器与平头光纤的封装问题之后,悬臂耦合器将会成为商用硅光子芯片的最佳选择。从工艺上来看,几种器件的加工成本与难点基本相当。通过比较几种常见的硅光子模斑转换器的结构性能以及制作工艺可知,近年来转换器的发展较为迅速,结构的尺寸越来越小,耦合效率进一步提高,制备工艺也越来越成熟。

尽管存在各种问题,但整体看来,转换器仍处于发展较为迅速的阶段,各种转换器的实验结果也越来越接近商用标准,随着科技的发展以及工艺的改进,硅光子纳米波导与平头光纤具有更高效的耦合、大的带宽、偏振无关等性能,必将能够在商用硅光子器件中得到广泛应用。

## 参 考 文 献

- [1] Tu X, Liow T Y, Song J, *et al.* 50-Gb/s silicon optical modulator with traveling-wave electrodes[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12776-12782.
- [2] Chen H, Verheyen P, Heyn P D, *et al.* -1 V bias 67 GHz bandwidth Si-contacted germanium waveguide p-i-n photodetector for optical links at 56 Gbps and beyond[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 4622-4631.

- [3] Fang Q, Liow T Y, Song J F, *et al.* WDM multi-channel silicon photonic receiver with 320 Gbps data transmission capability[J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 5106-5113.
- [4] Fang Q, Song J F, Liow T Y, *et al.* Ultralow power silicon photonics thermo-optic switch with suspended phase arms[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(8): 525-527.
- [5] He L, Liu Y, Galland C, *et al.* A high-efficiency nonuniform grating coupler realized with 248-nm optical lithography[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(14): 1358-1361.
- [6] Zhang H, Li C, Tu X, *et al.* High efficiency silicon nitride grating coupler with DBR[C]. *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, San Francisco, 2014: 14560355.
- [7] Zaoui W S, Rosa M F, Vogel W, *et al.* Cost-effective CMOS-compatible grating couplers with backside metal mirror and 69% coupling efficiency [J]. *Optics Express*, 2012, 20(26): 238-243.
- [8] Xiao Z, Luan F, Liow T Y, *et al.* Vertical coupling for silicon nitride waveguides using silicon grating couplers and transitions[C]. *Photonics Conference*, Burlingame, 2012: 13149903.
- [9] Wu H, Han M F, Guo X. Broadband high-efficiency grating coupler based on the tailored artificial equivalent refractive index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1105001.  
武华, 韩明夫, 郭霞. 基于等效折射率人工剪裁的宽带高效光栅耦合器[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1105001.
- [10] Zaoui W S, Kunze A, Vogel W, *et al.* CMOS-compatible nonuniform grating coupler with 86% coupling efficiency [C]. *European Conference and Exhibition on Optical Communication*, London, 2013: 13841840.
- [11] Kunze A, Letzkus F, Burghartz J, *et al.* Bridging the gap between optical fibers and silicon photonic integrated circuits[J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1277-1286.
- [12] Taillaert D, Bogaerts W, Bienstman P, *et al.* An out-of-plane grating coupler for efficient butt-coupling between compact planar waveguides and single-mode fibers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(7): 949-955.
- [13] Yamada H, Nozawa M, Kinoshita M, *et al.* Vertical-coupling optical interface for on-chip optical interconnection[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 698-703.
- [14] Wang Y, Yun H, Jaeger N A, *et al.* Broadband bidirectional vertical grating coupler [C]. *Optical Fiber Communication Conference and Exhibition*, Anaheim, 2016: 16244676.
- [15] Zhang Z, Zhang Z, Huang B, *et al.* CMOS-compatible vertical grating coupler with quasi Mach-Zehnder characteristics [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(3): 224-227.
- [16] Zhang M, Ren J W, Chen W, *et al.* Design and analysis of photorefractive long-period waveguide grating coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0313002.  
张明, 任建文, 陈文, 等. 光折变长周期波导光栅耦合器的设计和分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0313002.
- [17] Zhang C, Jin C, Zhang J, *et al.* Silicon waveguide grating coupler for perfectly vertical fiber based on a tilted membrane structure[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 820-823.
- [18] Zhou Z. Silicon photonic devices based on binary blazed gratings [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 091708.
- [19] Zhou W, Yang J, Zhang H, *et al.* Design of high-efficiency fully-etched binary blazed gratings nearly vertical coupler [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(12): 1048-1050.
- [20] Yu L, Liu L, Zhou Z, *et al.* High efficient vertical binary blazed grating coupler for chip level optical interconnections [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)-Laser Science to Photonic Applications*, San Jose, 2014: 14821948.
- [21] Yang J, Zhou Z, Jia H, *et al.* High-performance and compact binary blazed grating coupler based on an asymmetric subgrating structure and vertical coupling [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2614-2617.
- [22] Na N, Frish H, Hsieh I W, *et al.* Efficient broadband silicon-on-insulator grating coupler with low back reflection [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(36): 2101-2103.
- [23] Sacher W D, Huang Y, Ding L, *et al.* Ultra-efficient and broadband dual-level Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-on-SOI grating coupler[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)-Laser Science to Photonic Applications*, San Jose, 2014: 14832743.
- [24] Song J H, Budd R A, Lee B G, *et al.* Focusing grating couplers in unmodified 180-nm silicon-on-insulator CMOS [J]. *IEEE Photonics Technology*



- Letters, 2014, 26(8): 825-828.
- [25] Zhang H, Li C, Tu X, *et al.* High efficiency silicon nitride grating coupler with DBR[J]. Applied Physics A, 2014, 115(1): 79-82.
- [26] Zhao X, Li D, Zeng C, *et al.* Compact grating coupler for 700-nm silicon nitride strip waveguides [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(4): 1322-1327.
- [27] Wang Y, Yun H, Lu Z, *et al.* Apodized focusing fully etched subwavelength grating couplers [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 1-10.
- [28] Wang Y, Shi W, Wang X, *et al.* Design of broadband subwavelength grating couplers with low back reflection[J]. Optics Letters, 2015, 40(20): 4647-4650.
- [29] Li Y, Li L, Tian B, *et al.* Reflectionless tilted grating couplers with improved coupling efficiency based on a silicon overlay [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(13): 1195-1198.
- [30] Song J H, Rottenberg X. Low-back-reflection grating couplers using asymmetric grating trenches[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(4): 389-392.
- [31] Bakir B B, Gyves A V D, Orobtcouk R, *et al.* Low-loss (<1 dB) and polarization-insensitive edge fiber couplers fabricated on 200-mm silicon-on-insulator wafers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(11): 739-741.
- [32] Fang Q, Song J F, Liow T Y, *et al.* Cleaved fiber-to-nano waveguide mode converter for silicon photonics devices[C]. Photonics Global Conference, Singapore, 2012: 13291845.
- [33] Wood M, Sun P, Reano R M. Compact cantilever couplers for low-loss fiber coupling to silicon photonic integrated circuits[J]. Optics Express, 2012, 20(1): 164-172.
- [34] Fang Q, Liow T Y, Song J F, *et al.* Suspended optical fiber-to-waveguide mode size converter for silicon photonics[J]. Optics Express, 2010, 18(8): 7763-7769.
- [35] Chen L, Doerr C R, Chen Y K, *et al.* Low-loss and broadband cantilever couplers between standard cleaved fibers and high-index-contrast Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> or Si waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(23): 1744-1746.
- [36] Fang Q, Song J, Luo X, *et al.* Mode-size converter with high coupling efficiency and broad bandwidth [J]. Optics Express, 2011, 19(22): 21588-21594.
- [37] Jia L, Song J, Liow T Y, *et al.* Mode size converter between high-index-contrast waveguide and cleaved single mode fiber using SiON as intermediate material [J]. Optics Express, 2014, 22(19): 23652.
- [38] Barwicz T, Jantapolczynski A, Khater M, *et al.* An O-band metamaterial converter interfacing standard optical fibers to silicon nanophotonic waveguides[C]. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, Los Angeles, 2015: 15215966.
- [39] Fang Q, Song J, Luo X, *et al.* Low loss fiber-to-waveguide converter with a 3-D functional taper for silicon photonics [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(22): 2533-2536.
- [40] Shiraishi K, Chen S T. A spot-size converter with concatenated up-and down-tapers followed by a thin slab-waveguide [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(4): 485-488.
- [41] Shiraishi K, Takasaki R, Yoda H, *et al.* A viable spot-size converter for coupling between a single-mode fiber and a silicon-wire waveguide [C]. International Conference on Electronics Packaging, Toyama, 2014: 6826792.
- [42] Liu X, Xiao J B, Sun X H. Alignment and coupling between planar lightwave circuit chip and wedge-shaped fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 680-684.
- 刘旭, 肖金标, 孙小菡. 楔形光纤与半导体多量子阱平面光波光路芯片的耦合分析[J]. 光学学报, 2007, 27(4): 680-684.
- [43] Zou J, Yu Y, Ye M, *et al.* Short and efficient mode-size converter designed by segmented-stepwise method[J]. Optics Letters, 2014, 39(21): 6273.
- [44] Shoji T, Tsuchizawa T, Watanabe T, *et al.* Low loss mode size converter from 0.3 μm square Si waveguides to singlemode fibres [J]. Electronics Letters, 2002, 38(25): 1669-1670.
- [45] Pu M, Liu L, Ou H, *et al.* Ultra-low-loss nano-taper coupler for silicon-on-insulator ridge waveguide [J]. Optics Communications, 2010, 283(19): 3678-3682.
- [46] Takei R, Suzuki M, Omoda E, *et al.* Silicon knife-edge taper waveguide for ultralow-loss spot-size converter fabricated by photolithography[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(10): 101108.
- [47] Maegami Y, Takei R, Omoda E, *et al.* Spot-size converter with a SiO<sub>2</sub> spacer layer between tapered Si and SiON waveguides for fiber-to-chip coupling [J]. Optics Express, 2015, 23(16): 21287-21295.

- [48] Ku K N, Lee M C M. Cascade of two opposite tapers for butt-coupling between fibers and silicon photonic wires with large misalignment tolerance and low polarization dependency [C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, Anaheim, 2013: 13582278.
- [49] Yu X, Pandraud G, Pakula L S, *et al.* Combination of LPCVD and PECVD SiC in fabricating evanescent waveguides[C]. Annual International Conference on Nano/Micro-Engineered and Molecular Systems, Sendai, 2016: 16517808.
- [50] Liao C W, Yang Y T, Huang S W, *et al.* Fiber-core-matched three-dimensional adiabatic tapered couplers for integrated photonic devices[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(5): 770-774.
- [51] Li L H, Higo A, Kubota M, *et al.* A novel etching-oxidation fabrication method for 3D nano structures on silicon and its application to SOI symmetric waveguide and 3D taper spot size converter [C]. IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, Freiburg, 2008: 10179791.
- [52] Fang N, Yang Z, Wu A, *et al.* A novel method of fabricating 3D spot-size converter on (111) SOI[C]. IEEE International SOI Conference, New Paltz, 2008: 10322882.