

波导与光纤耦合设计研究进展

尤 杨 赵 茗 杨振宇

(华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 实现波导与光纤的耦合是各种集成光学器件从实验室走向实用的关键,耦合效率的高低直接影响到各种集成光学器件的性能,也是光纤通信和集成光学等领域必须解决的问题。其中,在光纤和波导是理想准直的条件下,模场失配损耗是影响波导与光纤耦合效率的最主要因素。综述了国内外几种典型的通过降低模场失配损耗来提高耦合效率的方法,具体包括楔形耦合器、棱镜耦合器和光栅耦合器,并对它们的特点做了总结和比较。结果表明,在提高耦合效率方面,制作相对简单的反向楔形耦合器具有绝对的优势,在光纤通信和集成光学领域中应用价值较高。

关键词 光电子学;波导光学;耦合效率;楔形耦合器;透镜耦合器;光栅耦合器

中图分类号 TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.020007

Progress of Study on Waveguide and Fiber Coupling Design

You Yang Zhao Ming Yang Zhenyu

(School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The effective coupling between waveguide and optical fiber is the key to the commercialization of integrated optical devices. The coupling efficiency not only directly affects the performance of these optical components, but also is a problem that must be solved in optical fiber communication and integrated-optics fields. In the case of fiber and waveguide in alignment, the mode-field mismatch loss is the main factor affecting the coupling efficiency. We mainly review some domestic and foreign methods of coupling between waveguide and optical fiber, including the wedge-shaped coupler, lens coupler and grating coupler. Summary and comparison are given for these methods. The result shows that a simply-fabricated reverse cone-shaped coupler has an absolute advantage in improving the coupling efficiency, so it has a higher application value in optical-fiber communication and integrated-optics field.

Key words optoelectronics; waveguide optics; coupling efficiency; wedge-shaped coupler; lens coupler; grating coupler

OCIS codes 230.0250; 060.1810; 060.2330; 230.7400

1 引 言

随着光通信向高速率、大容量方向发展,对光集成器件的需求越来越迫切,而集成光路应用到光纤通信中的一个关键问题是如何提高光纤与波导的耦合效率。因此,研究二者的有效耦合具有重要意义。

本文简要介绍波导与光纤耦合的机理,详细介绍国内外对于提高波导与光纤耦合效率的三类方法,最后对三类耦合器的特点进行比较并得出结论。

收稿日期: 2012-10-08; **收到修改稿日期**: 2012-11-14; **网络出版日期**: 2013-01-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50735007)资助课题。

作者简介: 尤 杨(1988—),女,硕士研究生,主要从事光纤与波导耦合等方面的研究。

E-mail: woyouyang@yahoo.com.cn

导师简介: 赵 茗(1976—),女,副教授,主要从事光电探测方面的研究。

E-mail: zhaoming@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

2 光纤与波导耦合的理论基础

波导与光纤耦合过程中的总插入损耗是光学耦合系统的一个重要指标。波导与光纤耦合的总插入损耗由四部分构成:传输损耗、菲涅耳反射损耗、对准偏差损耗和模场失配损耗。其中,光纤与波导中如弯曲、交叉等部分所造成的传输损耗可以通过合理的设计和制作来减少;菲涅耳反射损耗可以利用减反射膜和折射率匹配液来降低;对准偏差造成的损耗可以采用定位槽固定的方式,从而减少由于光纤波导的端面错位和端面不平行造成的对准偏差损耗。在光纤和波导是理想准直的条件下,模场失配损耗在整个耦合损耗中所占的比例最大,也是最难解决的问题,本文主要讨论模场失配损耗。

耦合效率 η 与模场匹配的关系可用光纤与波导模场分布的重叠积分表示为

$$\eta = \frac{\left| \iint E_w(x,y) E_f^*(x,y) dx dy \right|^2}{\iint E_w(x,y) E_f^*(x,y) dx dy \iint E_w^*(x,y) E_f(x,y) dx dy},$$

式中 E_w 表示波导模场, E_f 表示光纤模场。对于均匀单模光纤(SMF)来说,基模场强在光纤横截面上近似为高斯分布,是圆对称的,而波导模场一般是非对称的,且比光纤中模斑半径小。可见,单模光纤与波导的模场分布并不匹配,这将导致较大的耦合损耗。因此,在不影响光波的单模传输的条件下,改变光纤或波导的模场分布使二者尽可能地匹配是非常必要的。

3 光纤与波导耦合的进展研究

从 1972 年开始研究光纤对光纤的连接损耗^[1]至今,在集成光电子学领域,光纤与波导之间的耦合问题是一个长期的具有挑战性的课题。迄今,国内外已成功提出几种有效提高耦合效率的方法,并逐步接近实用化的程度。通过总结,本文将比较成熟的通过降低模场失配来提高耦合效率的办法归纳为以下三种:1) 楔形耦合器;2) 透镜耦合器;3) 光栅耦合器。

3.1 楔形耦合器

楔形耦合器从外形上说就是一个锥形结构的耦合器,其功能是把光纤中的模式与波导中的模式匹配,通常有正向、反向和狭缝式三种楔形结构。

3.1.1 正向楔形耦合器

正向楔形是一种最直观的结构,与光纤连接的一端扩展为光纤尺寸大小,与波导连接的一端拉成楔形。从外观上可分为三类:水平楔形变换、垂直楔形变换和两个方向上均作楔形变换。

1975 年,华盛顿大学的 Winn 等^[2]首次提出利用水平楔形结构解决多模波导与单模波导的耦合效率问题,从而引发了楔形结构的广泛研究。1994 年,日本 NNT 光电实验室在单模光纤与波导耦合过程中引入水平楔形结构^[3],并指出该水平楔形结构与光纤耦合存在较大横向容差,因此几乎可以应用到所有半导体光学仪器中。水平楔形耦合器的突出优点在于,其制作工艺相对于其他楔形结构来说较为简单^[4,5],一般采用标准的光刻、刻蚀等工艺就可以完成。

随着集成器件的发展,将耦合器和波导集成在同一个衬底上逐步成为关注的热点。在 2003 年的国际光纤通信会议上,英国 Bookham 公司的 Day 等^[6]最早提出水平楔形模斑转换器,如图 1(a)所示,实验数据显示该耦合器与光纤端面的耦合损耗接近 0.5 dB,即实现了较好的模式匹配。2005 年,在 Bookham 公司研究的基础上,中国科学院半导体研究所对该脊形结构做了改进并取得了一定的成绩,采用绝缘体上硅(SOI)片制作水平楔形模斑转换器,将正方形的脊形分为上脊和下脊两个部分^[7],如图 1(b)所示。模拟结果表明,在不采用模斑转换器的情况下,单模波导与光纤的耦合损耗接近 4 dB;采用后,模斑转换器与光纤的耦合损耗仅有 0.44 dB。这种模斑转换器的耦合效率较高,但也存在一些不足:器件尺寸太大,不适应小尺寸亚微米^[8]波导的要求且不利于单片集成。另外,偏振敏感性也是需要解决的问题。

在水平楔形模斑转换器的基础上,2003 年美国 Delaware 大学的 Sure 等^[9]报道了用灰度掩模方法制造的正向垂直楔形模斑转换器,如图 2 所示。这种耦合器虽然制作工艺相对复杂,但非常适合高密度单片集成。

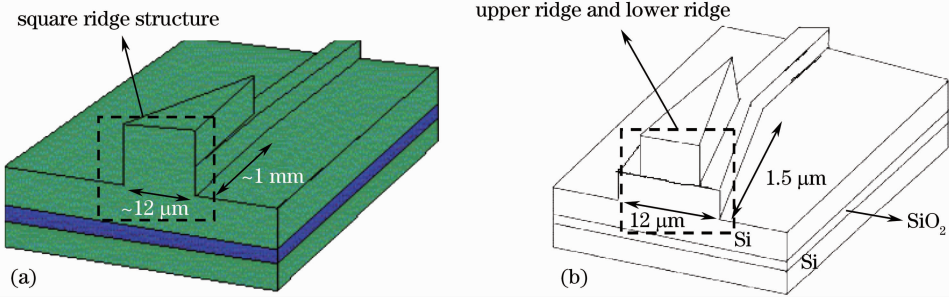


图 1 水平楔形模斑转换器。(a)正方脊的楔形模斑转换器^[6]；(b)双层脊的楔形模斑转换器^[7]

Fig. 1 Horizontal wedge-shaped spot size converter (SSC). (a) wedge-shaped SSC with square ridge^[6] ; (b) wedge-shaped SSC with double ridge^[7]

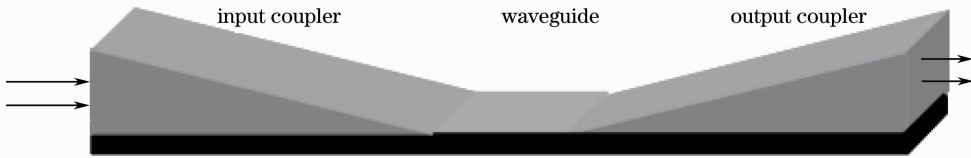


图 2 垂直楔形模斑转换器^[9]

Fig. 2 Vertical wedge-shaped SSC^[9]

综合水平楔形结构和垂直楔形结构的优点,最理想的就是两个方向都拉锥的双向三维楔形模斑转换器。1992年,美国贝尔通信实验室的 Deri 等^[10]第一次提出对波导进行水平和垂直两个方向拉锥,实验得到该模型与光纤的耦合损耗为 2.6 dB,但其缺点是工艺复杂。2003年,美国 Confluent Photonics 公司的 Fijol 等^[11]用灰度光刻和抛光工艺分别制作了同一种结构的双向拉锥三维(3D)模斑转换器,如图 3(a)所示,耦合效率高,但对准容差小。

三维楔形结构^[12]还可以在不同的轴向(Z轴)位置分别进行水平和垂直拉锥。2006年,奥地利 Johannes Kepler 大学 Holly 等^[13,14]制造出这种三维楔形模斑转换器,如图 3(b)所示。光束从光纤出射后,通过引入一层防反射膜到达垂直方向锥形,而后通过水平方向锥形,最终在线波导中稳定传输。2007年,日本 Utsumiya 大学的 Shiraiishi 等^[15]在理论和实验上均验证了该模型的有效性,实验结果显示,通过该模斑转换器可以使得光纤与硅线波导的耦合损耗由 8.64 dB 降低至 0.5 dB。

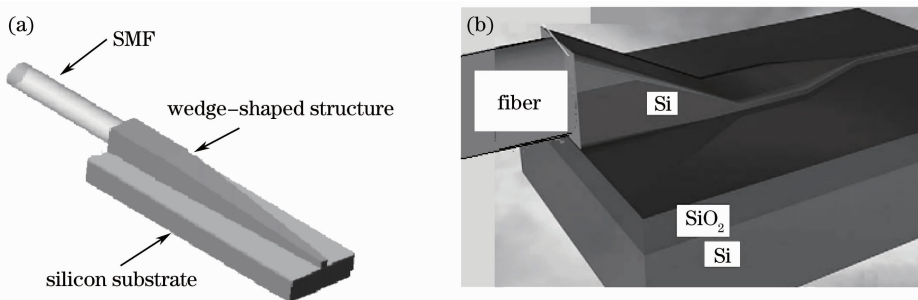


图 3 三维拉锥模斑转换器。(a)双向拉锥模斑转换器^[11]；(b)不同位置拉锥模斑转换器^[13]

Fig. 3 3D tapered SSC. (a) Tapered SSC in two directions^[11] ; (b) tapered SSC in different position^[13]

3.1.2 反向楔形耦合器

正向楔形耦合器是与小尺寸的波导连接一端拉成楔形,而反向楔形耦合器则相反,与大尺寸的光纤连接一端拉成楔形。其特点是随着楔形尺寸逐渐缩小,芯区内的场趋于截止,光场逐渐向包层渗透,模斑尺寸随之增大,从而实现波导模场与光纤模场的有效耦合。1992年,德国电信公司的 Zengerle 等^[16]首次提出在光纤波导之间引入反向楔形模斑转换器,这一概念的提出引起了学术界的极大关注,并成为了研究的热点。直至美国 Cornell 大学的 Almeida 等^[17]制造出纳米反向楔形模斑转换器,如图 4(a)所示,克服了之前该类耦合器纵向尺寸大、背反射较强的缺点,从而引发了反向楔形模斑转换器的革新。尽管这种反向楔形模斑转换器

设计很巧妙,但耦合损耗仍然高达 3 dB 以上,而且对于偏振光非常敏感。

针对反向楔形模斑转换器耦合效率较低的问题,先后有很多课题组进行了研究,较为突出的是日本 NTT 公司。2002 年,该公司报道了反向楔形模斑变换的损耗低于 1 dB^[18],如图 4(b)所示。2008 年,在该公司的实验中,更是将该耦合器与脊形波导的耦合损耗降低到了 0.7 dB^[19]。相比较而言,日本 NTT 公司耦合器的主要优势在于其耦合效率高,而美国 Cornell 大学的耦合器则是目前报道的尺寸最小的 SOI 模斑转换器,它与光纤接触的楔形端面尺寸为纳米量级且其长度仅 40 μm ,但是偏振敏感性是其不足之处,需进一步改进。

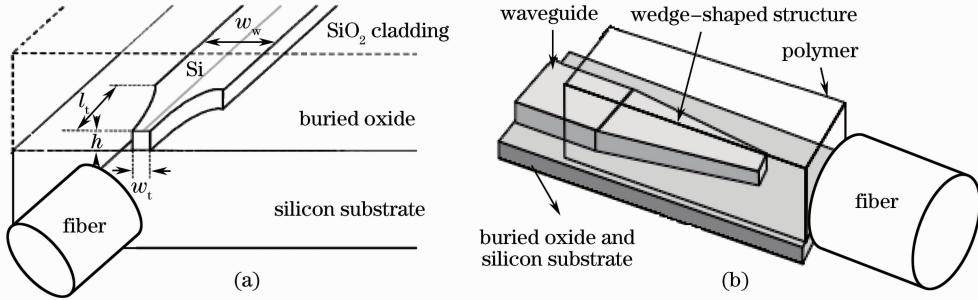


图 4 反向楔形模斑转换器。(a)纳米反向楔形模斑转换器^[17]; (b)高效反向楔形模斑转换器^[18]

Fig. 4 Reverse wedge-shaped SSC. (a) Nanoscale reverse wedge-shaped SSC^[17]; (b) efficient reverse wedge-shaped SSC^[18]

2011 年,中国科学院半导体研究所的 Ren 等^[20]在前人提出的模型基础上,对反向楔形耦合器的拉锥线形进行了深入研究,得到结论:采用指数或平方线形拉锥的楔形结构在耦合效率、设备尺寸、制造公差和对准容差方面均优于直线拉锥楔形耦合器。

3.1.3 狭缝式耦合器

狭缝式耦合器由两侧的波导、中间的狭缝和外包层构成。其原理是随着波导狭缝端口处尺寸的缩小,模场在端口处离散化,增加了波导端口处模场与光纤模场的交叠,而且狭缝端口处的有效折射率与标准光纤的有效折射率达到了很好的匹配,进而有效地降低了耦合损耗。2004 年,美国 Cornell 大学研究小组首先提出一种新颖的狭缝式波导结构^[21],引起了学术界的轰动。中国科学院半导体研究所的 Liu 等^[22]在 2007 年通过模拟分析得到狭缝式模斑转换器的损耗理论计算值为 1.8 dB,如图 5 所示。

从 2008 年至今,新加坡微电子研究院致力于狭缝式耦合器的实验研究,在光纤和氮化硅波导的耦合实验中引入了该模斑转换器^[23,24]。虽然其尺寸小,耦合效率高,同样,它也具有偏振相关性高且工艺难度较大的缺点。

3.2 透镜耦合器

透镜(或棱镜)的作用在于引入合适入射角的光波,使其在平板波导的导波层上下介质界面处发生全反射并达到相位匹配,从而达到与线波导的高效率耦合^[25,26]。透镜耦合器通常包括两类:普通棱镜耦合器和折射率渐变棱透耦合器。

3.2.1 普通棱镜耦合器

2004 年,美国 Delaware 大学的 Lu 等^[27]结合棱镜和垂直楔形耦合器的优点,制造出了棱镜耦合器,如图 6 所示。该耦合器为器件平面集成带来很大的灵活性,且实验得到的耦合效率为 70%。该耦合器的显著优点是应用灵活,制作简单,对准方便,耦合效率高,3 dB 带宽较宽。但该耦合方法需要将棱镜放在距离波

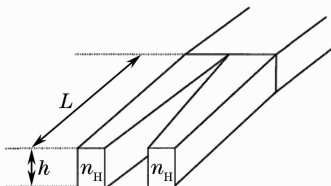


图 5 狭缝式模斑转换器^[22]

Fig. 5 Slot-shaped SSC^[22]

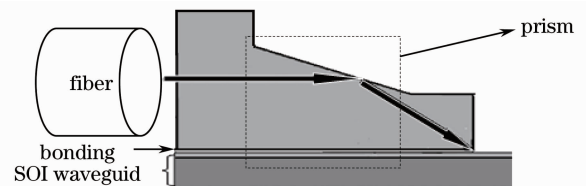


图 6 普通棱镜耦合器^[27]

Fig. 6 Ordinary prism coupler^[27]

导表面很近的地方,很容易损坏波导,且对偏振光比较敏感。

3.2.2 折射率渐变透镜耦合器

2005年,加拿大微结构研究所的Janz等^[28]研制出渐变折射率(GRIN)^[29]透镜耦合器,此后该结构被广泛地应用在集成波导与光纤的耦合中。新加坡数据储存研究所Loh团队^[30]在该领域的研究中处于领先地位,他们在拉锥波导末端制造出单层GRIN透镜结构,如图7所示。研究表明,当GRIN透镜的折射率为连续曲线型分布时,选用高斯型折射率分布比抛物线型的畸变小,并且可以减小波导的数值孔径。这种耦合器的优点体现在耦合效率高(78%),光刻工艺相对简单。但这种单层棱镜结构对输入光的模式要求高,且对准容差小。

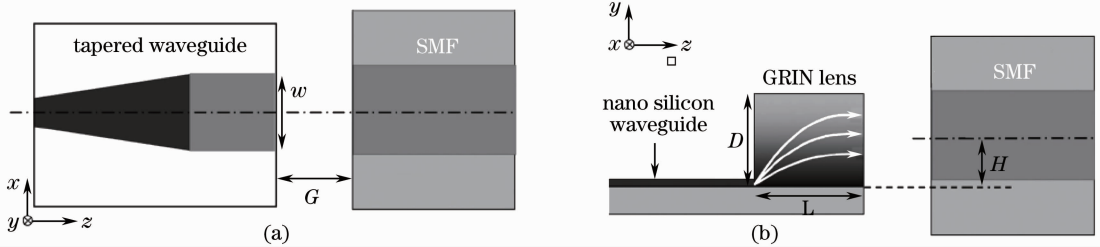


图7 拉锥波导末端集成GRIN透镜耦合器^[30]。(a)俯视图;(b)侧视图

Fig. 7 Integrated GRIN lens coupler at the end of tapered waveguide^[30]. (a) Top view; (b) side view

针对上述单层棱镜结构的缺点,2010年新加坡数据储存研究所将透镜的材料由一种发展为两种^[31,32],并通过特殊工艺实现多层结构,如图8所示。这两种材料的高折射率差使得通过透镜后垂直方向的模斑尺寸更接近光纤中的模斑尺寸,因此,透镜与光纤的横向对准容差也会很大。然而多层耦合器的缺点是难于集成。

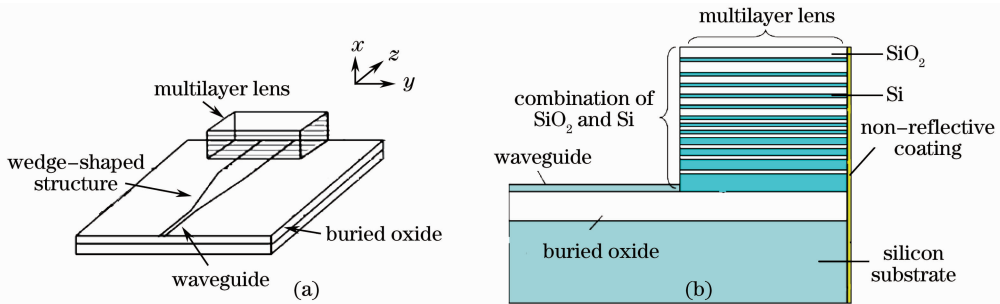


图8 多层透镜耦合器^[31]。(a)立体图;(b)侧视图

Fig. 8 Multi-layer lens coupler^[31]. (a) Stereogram; (b) side view

3.3 光栅耦合器

光栅耦合器是一种非常有前途的耦合器,通过光栅的衍射作用可以把波导中的光有效地耦合进光纤,提高耦合效率。按照光束传输方向可分为垂直耦合结构和平行耦合结构。

3.3.1 垂直型光栅耦合器

从2002年比利时Ghent大学研究人员首次提出在SOI上制作易于集成的垂直光栅耦合器起^[33],近年来垂直型光栅耦合器得到了很大的关注。垂直型光栅耦合器的特点是光在传输过程中传输方向改变了 90° ,利用制作在波导表面的衍射光栅结构将垂直于波导表面入射的光衍射进宽平面波导中,光再经过模斑变换器进入小尺寸波导。

2000年,英国Surrey大学Ang等^[34]制作的垂直光栅耦合器的光栅结构长达几百微米,而且该结构的耦合效率低,带宽很窄,因此在实际使用中意义不大。2002年,比利时Ghent大学Taillaert等^[33]最先研制出短光栅耦合器,用于单模光纤和GaAs-AlO_x波导的垂直耦合。经过进一步设计,他们于2005年制作出如图9所示的长度仅为 $10\ \mu\text{m}$ 的短光栅结构耦合器^[35],其中将光纤倾斜 $8^\circ\sim 10^\circ$ 放置的目的是避免光经过光栅时向线波导方向的二阶反射。相对于长光栅耦合器来说,短光栅耦合器的优点在于不需要设计一个聚焦棱镜结构,结构更为紧凑,便于制作和封装,而且能够与标准的互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容,带

宽也得到了很大的提高。光束经过该光栅后向四个方向传输:向上衍射、向衬底衍射、向后反射及通过光栅向前透射,其中向上衍射的能量直接决定了光栅耦合器的耦合效率。在图 9 所示的结构中,由于向上衍射的能量较小,实验测得耦合效率只有 33%^[35]。

为了提高光栅向上的衍射能量,2006 年 Ghent 大学的 Roelkens 等^[36]提出一种新结构,在原来的光栅结构上面覆盖一层多晶硅,如图 10 所示。多晶硅层改变了光栅的衍射特性,使向衬底衍射的光干涉减弱而向上衍射的光干涉增强,提高了耦合效率,实验结果表明该结构的耦合器耦合效率为 55%。

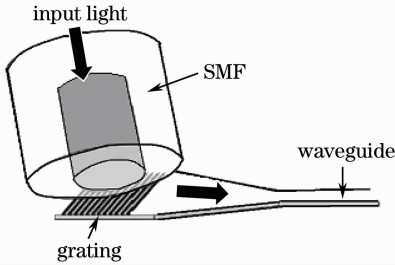


图 9 普通的垂直光栅耦合器^[35]

Fig. 9 Ordinary vertical grating coupler^[35]

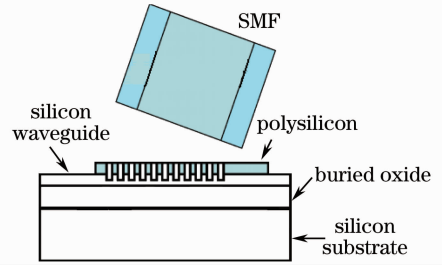


图 10 有多晶硅覆盖层的垂直光栅耦合器^[36]

Fig. 10 Vertical grating coupler with polycrystalline silicon coating^[36]

除了通过改变光栅结构来提高耦合效率外,还可以采用增加对衬底衍射光反射的方法。2007 年, Ghent 大学的研究人员又提出一种新模型:在光栅下加入金属反射镜^[37],实验测试得该模型的最大耦合效率为 69%。其缺点是引入一个金属反射镜大大增加了工艺的难度,无法与 CMOS 工艺兼容。为了克服制作工艺复杂的缺陷,他们利用改进的聚焦离子束技术制造出与 CMOS 工艺兼容的斜光栅耦合器^[38],其结构如图 11 所示。实验测得耦合效率为 46%,实验与模拟耦合效率之间存在较大差值,有望通过进一步改善工艺条件来缩小差距。

在上述垂直光栅耦合器中,光纤与波导表面的垂线均有 $8^\circ \sim 10^\circ$ 的倾斜角。为了实现光路的对中,又要避免二阶反射,2007 年 Ghent 大学研究人员提出了一种光纤与波导表面完全垂直耦合的耦合器^[39],被称为狭缝结构的光栅耦合器,如图 12 所示。正是由于这条狭缝的存在,使得二阶反射的光被狭缝反射回去再次被光栅衍射,大大减少了二阶反射对耦合效率的影响。理论计算表明,该耦合器的耦合效率为 80%。但其缺点是光刻的工艺难度较大。为了克服上述工艺上的难度,2008 年他们又提出一种用于垂直光纤和波导的新型耦合方案^[40],即在完全垂直放置的光纤接触面上附着上有一定倾角(10° 左右)的聚合物材料。该方法等价于将光线倾斜放置的情况,缺点是耦合效率较低。

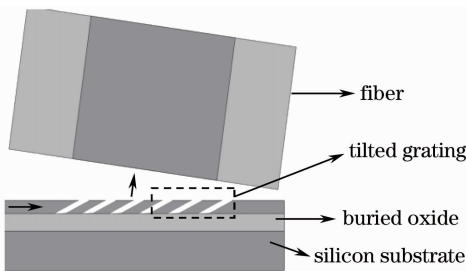


图 11 斜光栅耦合器^[38]

Fig. 11 Tilted grating coupler^[38]

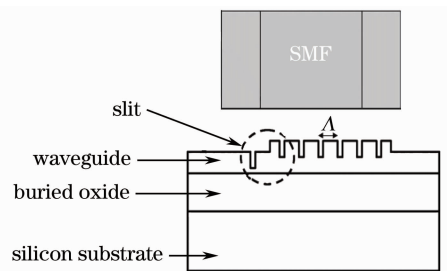


图 12 带狭缝的光栅耦合器^[39]

Fig. 12 Grating coupler with a slit^[39]

在国内,有关垂直型光栅耦合器的研究相对集中在香港中文大学。2008~2009 年,该大学的 T 研究团队致力于建立啾啾光栅模型^[41~44],即将普通光栅改为由啾啾光栅和均匀周期光栅两部分组成,然而得到的耦合效率和带宽均不理想。针对耦合效率这一指标,2010 年他们在 Ghent 大学提出的短光栅耦合器^[33]的基础上,增加顶层硅厚度和光栅刻蚀深度^[45],得到耦合效率随之增加至 46%。又针对带宽这一指标,于 2011 年提出一种新型的光栅耦合器^[46,47],如图 13 所示,即将光栅做成阵列形状。当光栅中模式的有效折射率与 SiO_2 的折射率相近时,1 dB 带宽可以达到 100 nm,是目前带宽的最大值。

3.3.2 水平光栅耦合器

2003~2005年,英国 Surrey 大学的研究小组致力于研发水平光栅耦合器^[48~51],其特点是光一直沿水平方向传输,如图 14 所示。该耦合器由双光栅组成,光纤与顶层 SiON 直接对接,然后用第一个光栅把光耦合进 Si₃N₄ 过渡层,用第二个光栅把光耦合进较薄的 SOI 层。实验测得该耦合器是偏振无关的,且耦合效率为 55%,是目前报道的与小尺寸波导耦合最有效的水平光栅耦合器。该结构也存在一些缺点需要进一步改进:耦合带宽相当窄,希望通过光栅啁啾和改变占空比来增加带宽;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。因此,未来可以从结构设计到器件制作上进行优化。

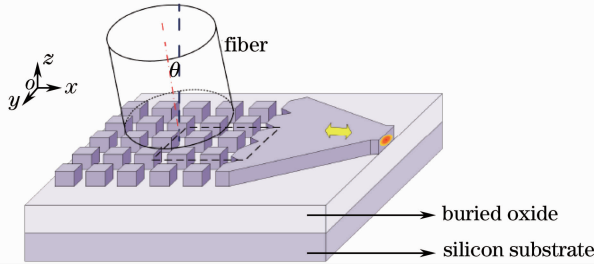


图 13 阵列形状的光栅耦合器^[46]

Fig. 13 Array-shaped grating coupler^[46]

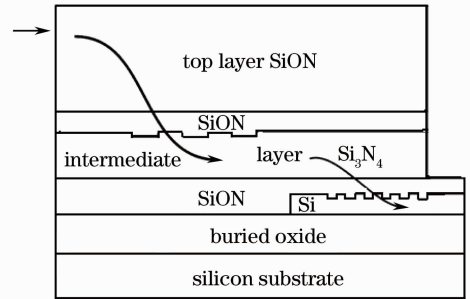


图 14 水平双光栅耦合器^[48]

Fig. 14 Horizontal double-grating coupler^[48]

4 特点比较

在光互连以及光子集成中广泛应用了各种光学耦合器,包括楔形耦合器、棱镜耦合器以及光栅耦合器。前面已经介绍了这三种耦合器的结构、工作原理和器件特性,表 1 从耦合效率、带宽和优缺点方面对它们进行比较。

表 1 耦合器的特点比较

Table 1 Comparison of coupler characteristics

Device structure	Coupling efficiency	Bandwidth	Advantage	Disadvantage	
Wedge-shaped coupler	Positive wedge-shaped	Higher	Wide	Simple processing	Difficult to integrate; low coupling efficiency
	Reverse wedge-shaped	Higher	Wide	Large alignment tolerance	Difficult processing; high polarization sensitivity
	Slot wedge-shaped	High	Wide	Easy to integrate	Difficult processing; high polarization sensitivity
Lens coupler	Ordinary prism	High	Wider	Large alignment tolerance	Difficult to integrate; high polarization sensitivity
	GRIN lens	Higher	Wide	Large alignment tolerance	Difficult processing; high polarization sensitivity
Grating coupler	Vertical grating	High	Widest	Easy to integrate; large alignment tolerance	High polarization sensitivity
	Horizontal grating	High	Narrow	High coupling efficiency	Narrow bandwidth; difficult process

5 结束语

本文首先简要分析了影响光纤与波导耦合效率的四个因素。其次,针对模斑失配这一主要因素,综述了降低失配损耗的主要方式,并归类为以下三种:楔形耦合器、透镜耦合器和光栅耦合器。各种耦合器均有各自的特点,在与器件集成时要考虑到工艺精度和难度、效率和带宽等多方面的因素而灵活选择。正向楔形耦合器通常需要一个抗反射的覆盖层来减少表面强烈的背反射,给制造带来困难;如果楔形耦合器的尺寸进一步减小,粗糙的表面会带来显著的散射,这就需要制造足够光滑的表面,更增加了制作难度;耦合器两端不同宽度的波导之间的绝热光转换需要相当长的楔形波导才能实现。反向楔形结构的优点是耦合器尺寸小、对

光纤与波导的对准容差大、相应波长范围广和耦合效率较高,但其偏振敏感性需要解决。折射率渐变透镜耦合器的制作工艺复杂,难于集成。光栅耦合器的耦合效率在理论上可以达到很高,然而垂直光栅耦合结构相对复杂,实际耦合效率偏低,但它不需要画片与端面抛光,不但减少了工艺步骤,而且减小了对波导的损伤。

考虑到光波导耦合器和有源器件的集成,高耦合效率、制作相对简单的反向楔形耦合器成为大家的首选,在光纤通信中应用价值较高。

参 考 文 献

- 1 R. B. Dyott, J. R. Stern, J. H. Stewart. Fusion junctions for glass-fiber waveguides[J]. *Electron. Lett.*, 1972, **8**(11): 290~292
- 2 R. K. Winn, J. H. Harris. Coupling from multimode to single-mode linear waveguides using horn-shaped structures[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, 1975, **23**(1): 92~97
- 3 Osamu Mitomi, Kazuo Kasaya, Hiroshi Miyazawa. Design of a single-mode tapered waveguide for low-loss chip-to-fiber coupling[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(8): 1787~1793
- 4 Zhang Xiefei, Xiao Jinbiao, Zhu Jianbin *et al.*. Study of spot size converter based on optical tapered planar waveguide[J]. *J. Southeast University*, 2003, **33**(1): 1~4
张夕飞, 肖金标, 朱建彬 等. 平面锥形光波导模斑转换器的研究[J]. *东南大学学报*, 2003, **33**(1): 1~4
- 5 Ma Hong, Xinjian, Chen Sihai. Monolithic integration of spot-size converters with 1.3 μm polarization-insensitive semiconductor optical amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 756~758
马 宏, 易新建, 陈四海. 1.3 μm 偏振无关半导体光放大器单片集成模斑变换器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 756~758
- 6 I. Day, I. Evans, A. Knights *et al.*. Tapered silicon waveguides for low insertion loss highly-efficient high-speed electronic variable optical attenuators[J]. *OFC*, 2003. 249~251
- 7 Yangping Li, Jinzhong Yu, Shaowu Chen. Rearrangeable nonblocking SOI waveguide thermo-optic 4×4 switch matrix with low insertion loss and fast response[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(8): 1641~1643
- 8 Dong Zhengfang, Zhou Zhen, Wang Kunbo *et al.*. Optimization and analysis for submicrometer-scale silicon waveguide optical phase modulator[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(10): 1023011
董正芳, 周 震, 王坤博 等. 亚微米硅基波导光学相位调制器的优化分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(10): 1023011
- 9 A. Sure, T. Dillon, J. Murakowski *et al.*. Fabrication and characterization of three dimensional silicon tapers[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(26): 3555~3561
- 10 R. J. Deri, C. Caneau, E. Colas *et al.*. Integrated optic mode-size tapers by selective organometallic chemical vapor deposition of InGaAsP/InP[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(8): 952~954
- 11 J. J. Fijol, E. E. Fike, P. B. Keating *et al.*. Fabrication of silicon-on-insulator adiabatic tapers for low loss optical interconnection of photonic devices[C]. *SPIE*, 2003, **4997**: 157~170
- 12 Yang Qing, Shi Jielong, Sun Weisheng *et al.*. Low-loss splicing based on the technique of mode-field matching by fusion taper rig[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 1006001
杨 清, 施解龙, 孙伟胜 等. 基于光纤拉锥模场匹配技术的光子晶体光纤低损耗熔接[J]. *光学学报*, 2012, **32**(10): 1006001
- 13 R. Holly, K. Hingerl. Fabrication of silicon vertical taper structures using KOH anisotropic etching[J]. *Microelectron. Engng.*, 2006, **83**(4): 1430~1433
- 14 R. Holly, Kurt Hingerl, Robert Merz *et al.*. Fabrication of silicon 3D taper structures for optical fibre to chip interface[J]. *Microelectron. Engng.*, 2007, **84**(5): 1248~1251
- 15 K. Shiraishi, H. Yoda, H. Ikedo *et al.*. A spot-size converter using a nonlinear vertical up-taper for efficient coupling of a single-mode fiber to a Si-wire waveguide[C]. 4th IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2007. 107~109
- 16 R. Zengerle, H. Briickner, H. Olzhausen *et al.*. Low-loss fiber-chip coupling by buried laterally tapered InP/InCaAsP waveguide structure: nanotaper for compact mode conversion[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(7): 631~632
- 17 Wilson R. Almeida, Roberto R. Panepucci, Michal Lipson. Nanotaper for compact mode conversion[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(15): 1302~1304
- 18 T. Shoji, T. Tsuchizawa, T. Watanabe *et al.*. Low loss mode size converter from 0.3 μm square Si wire waveguides to single mode fibers[J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(25): 1669~1670
- 19 Tai Tsuchizawa, Koji Yamada, Toshifumi Watanabe *et al.*. Spot-size converters for rib-type silicon photonic wire

- waveguides[C]. IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2008. 200~202
- 20 Guanghui Ren, Shaowu Chen, Yongpeng Cheng *et al.*. Study on inverse taper based mode transformer for low loss coupling between silicon wire waveguide and lensed fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(19): 4782~4788
- 21 Wilson R. Almeida, Qianfan Xu, Carlos A. Barrios *et al.*. Guiding and confining light in void nanostructure[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(11): 1209~1211
- 22 Yan Liu, Jinzhong Yu. Low-loss coupler between fiber and waveguide based on silicon on insulator slot waveguides[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(32): 7858~7861
- 23 S. H. Tao, Junfeng Song, Q. Fang *et al.*. Improving coupling efficiency of fiber-waveguide coupling with a double-tip coupler[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(25): 20803~20808
- 24 Shaohua Tao, Bingchu Yang, Guo-Qiang Li *et al.*. An optical power splitter with variable power splitting ratio[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(14): 1004~1006
- 25 Zhou Jinchao, Huang Zuohua, Zeng Xianyou *et al.*. Simultaneous measurement of prism and waveguide film parameters by waveguide technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 1212001
周进朝, 黄佐华, 曾宪佑 等. 光波导技术同步测量棱镜及波导薄膜参数[J]. 光学学报, 2012, **32**(12): 1212001
- 26 Cui Naidi, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu *et al.*. Two-stage photonic crystal beam compressor based on silicon nanowire waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0123004
崔乃迪, 梁静秋, 梁中翥 等. 基于硅纳米线波导的两级光子晶体缩束器[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 0123004
- 27 Zhaolin Lu, Dennis W. Prather. Total internal reflection-evanescent coupler for fiber to waveguide integration of planar optoelectronic devices[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(15): 1748~1750
- 28 S. Janz, B. Lamontagne, A. Delage *et al.*. Single layer a-Si GRIN waveguide coupler with lithographically defined facets [C]. IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2005. 129~131
- 29 Wu Zhiwei. Step refractive index triangular prism generating non-diffracting linear structural beam [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(4): 042301
吴志伟. 变折射率三角棱镜产生无衍射线结构光[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(4): 042301
- 30 Qian Wang, Ter-Hoe Loh, Doris Keh Ting Ng *et al.*. Design and analysis of optical coupling between silicon nanophotonic waveguide and standard single-mode fiber using an integrated asymmetric super-GRIN lens[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2011, **17**(3): 581~589
- 31 Ter-Hoe Loh, Qian Wang, Jie Zhu *et al.*. Ultra-compact multilayer Si/SiO₂ GRIN lens mode-size converter for coupling single-mode fiber to Si-wire waveguide[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(21): 21519~21533
- 32 Ter-Hoe Loh, Qian Wang, Jie Zhu *et al.*. Realization of multilayer Si/SiO₂ super-high N. A. GRIN lens on Si-waveguide coupling to single-mode optical fiber[C]. CLEO/QELS, 2010. 1~2
- 33 Dirk Taillaert, Wim Bogaerts, Peter Bienstman *et al.*. An out-of-plane grating coupler for efficient butt-coupling between compact planar waveguides and single-mode fibers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **38**(7): 949~955
- 34 T. W. Ang, G. T. Reed, A. Vonsovici *et al.*. Effects of grating heights on highly efficient unibond SOI waveguide grating couplers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(1): 59~61
- 35 Dirk Taillaert, Roel Baets, Pieter Dumon *et al.*. Silicon-on-insulator platform for integrated wavelength-selective components[C]. Workshop on Fibers and Optical Passive Components, 2005. 115~120
- 36 Gunther Roelkens, Dries Van Thourhout, Roel Baets *et al.*. High efficiency silicon-on-insulator grating coupler based on a poly-silicon overlay[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24): 11622~11630
- 37 Frederik Van Laere, Gunther Roelkens, Melanie Ayre *et al.*. Compact and highly efficient grating couplers between optical fiber and nanophotonic waveguides[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 151~156
- 38 Jonathan Schrauwen, Frederik Van Laere, Dries Van Thourhout *et al.*. Focused-ion-beam fabrication of slanted grating couplers in silicon-on-insulator waveguides[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(11): 816~818
- 39 Gunther Roelkens, Dries Van Thourhout, Roel Baets. High efficiency grating coupler between silicon-on-insulator waveguides and perfectly vertical optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(11): 1495~1497
- 40 Stijn Scheerlinck, Jonathan Schrauwen, Gunther Roelkens *et al.*. Vertical fiber-to-waveguide coupling using adapted fibers with an angled facet fabricated by a simple molding technique[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(18): 3241~3245
- 41 X. Chen, C. Li, H. K. Tsang. Characterization of silicon-on-insulator waveguide chirped grating for coupling to a vertical optical fiber[C]. *Internationall Conference on Optical MEMS and Nanophotonics*, 2008. TU2.4
- 42 Xia Chen, Chao Li, Hon Ki Tsang. Fabrication-tolerant waveguide chirped grating coupler for coupling to a perfectly vertical optical fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(23): 1914~1916

- 43 Xia Chen, Chao Li, Hon Ki Tsang. Non-uniform focusing grating for coupling between silicon waveguide and vertical optical fiber[C]. LEOS, 2009. TuV3
- 44 X. Chen, C. Li, H. K. Tsang. Chirped grating for efficient coupling from a silicon waveguide to a vertical optical fiber [C]. International Conference on Photonics in Switching, 2008
- 45 Xia Chen, Chao Li, Christy K. Y. Fung *et al.*. Apodized waveguide grating couplers for efficient coupling to optical fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(15): 1156~1158
- 46 Xia Chen, Hon K. Tsang. Polarization-independent grating couplers for silicon-on-insulator nanophotonic waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 796~798
- 47 Xia Chen, Christy K. Y. Fung, Yi Min Chen *et al.*. Subwavelength waveguide grating coupler for fiber-to-chip coupling on SOI with 80 nm 1 dB-bandwidth[C]. CLEO, 2011. CMO4
- 48 Goran Z. Masanovic, Vittorio M. N. Passaro, Graham T. Reed. Dual grating-assisted directional coupling between fibers and thin semiconductor waveguides[J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2003, **15**(10): 1395~1397
- 49 G. Z. Masanovic, V. M. N. Passaro, G. T. Reed. Coupling to nanophotonic waveguides using a dual grating-assisted directional coupler[J]. *IEEE Proc. Optoelectron*, 2005, **152**(1): 41~48
- 50 Goran Z. Masanovic, Graham T. Reed, Vittorio M. N. Passaro *et al.*. Preliminary experimental results of a dual grating-assisted directional coupler on SOI[C]. *SPIE*, 2005, **5730**: 173~180
- 51 Goran Z. Masanovic, Graham T. Reed, William Headley *et al.*. A high efficiency input/output coupler for small silicon photonic devices[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7374~7379