光子和光电子集成专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022040701

硅基片上偏振分束器研究进展

程光炼，沈　力*

（华中科技大学 武汉光电国家研究中心，武汉 430074）

摘　要： 硅基集成光波导具有很高的折射率对比度，能将光场限制在纳米尺度，是制备结构紧凑、高效的纳米光子器件的关键。但是，高折射率对比度也会引起波导双折射效应。因此，几乎所有纳米光子器件都是偏振相关的。偏振分束器是偏振分集光子集成电路中克服硅纳米器件强偏振依赖性的重要组成部分，在片上相干通信、传感与环境检测等领域具有广阔的应用前景。目前报道的基于亚波长光栅波导结构的偏振分束器，工作带宽在 200 nm 以上，消光比也超过了 20 dB。文章简述了各种类型偏振分束器的工作原理，对其尺寸、消光比、带宽等方面的性能进行了比较，分析了各类偏振分束器的优劣势，最后总结了其主要应用场景并展望了未来发展方向。

关键词： 集成光电子学；纳米光子器件；偏振相关；偏振分束器

中图分类号： TN386　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0294－08

Silicon Based On-chip Polarization Beam Splitters

CHENG Guanglian, SHEN Li

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, CHN)

Abstract: Silicon photonic waveguides, exhibiting high refractive index contrast and nano-scale optical field, are capable to producing compact and efficient nanophotonic devices. However, birefringence is inevitable for high refractive index contrast waveguides, and thus almost all nanophotonic devices are polarization sensitive. Polarizing beam splitter (PBS) is an important component to overcome the strong polarization dependence of silicon nanodevices in polarization diversity photonic integrated circuits, and has received much attention in recent years. The recently reported sophisticated subwavelength grating waveguide (SWG) based PBS has a working bandwidth of more than 200 nm and an extinction ratio of more than 20 dB. In this paper, the working principles of various types of PBSs are briefly deswoedcribed, and their performances in terms of size, extinction ratio and bandwidth are illustrated, and the advantages and disadvantages are also analyzed. Finally, the application scenarios and future development of PBS are summarized and prospected.

Key words: integrated optoelectronics; nanophononics devices; polarization dependent; polarization beam splitters

0　引言

基于绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator，SOI)平台的光子集成技术以其低损耗、结构紧凑，以及可与COMS工艺兼容等一系列优点被广泛应用于通信、传感等领域[1-2]。这些优点也使得利用电子设备来制造光子集成电路(Photonic Integrated Circuit，PIC)成为可能。但是由于制造的局限性，最初的研究主要集中在大截面 SOI 光波导上，以实现低损耗的光传输[3]。对于大尺寸脊型波导，其弯曲半径一

收稿日期：2022－04－07.

基金项目：国家自然科学基金项目(62175080，51874301).

* **通信作者：**沈　力　**E-mail：** lishen@hust.edu.cn

般在 100 μm 以上[4]，因此难以实现超小型集成光子器件。近年来，随着工艺制造水平的不断提升，SOI 光波导尺寸不断减小，在片上实现了高度紧凑的光子集成器件，如光栅耦合器[5-8]、多模干涉耦合器[9-11]等。然而，硅光子波导通常具有双折射效应，因此有高度的偏振依赖性。这种双折射会在 PIC 中带来很强的偏振敏感性问题。对于光纤通信系统，来自光纤的光通常具有随机偏振态，因此信噪比在经过偏振敏感的 PIC 后会下降。理论上通过精细的设计可以实现 PIC 偏振不敏感。但是，由于这些高对比度波导的纳米级工艺精度，在技术上很难实现。

解决基于硅基纳米波导的光子集成器件的偏振敏感性问题的一般方案是使用偏振分集技术[12]。其基本原理如下：输入光由偏振分束器（Polarizing Beam Splitter，PBS）分开，并获得两个偏振光束（横电模 TE 和横磁模 TM），然后将一个偏振光束（例如 TM）用偏振旋转器转换成正交光束（TE），接着具有相同偏振状态的两个光束分别进入两个相同的 PIC。作为核心组件之一，PBS 在实现偏振不敏感的 PIC 方面起着巨大的作用。此外，PBS 也是许多应用的关键器件，例如在相干光通信中的应用，可提高频谱效率，从而提高通信系统容量。

1　偏振分束的机理

PBS 是片上偏振调控的基本功能器件，其主要作用是对 TE 和 TM 偏振态进行分离或者结合。目前，实现片上 PBS 功能的多种结构已相继被报道，包括多模干涉仪（Multimode Interferometer，MMI）[13-20]、马赫-曾德尔干涉仪（Mach-Zehnder Interferometer，MZI）[21-24]、布拉格光栅（Bragg Grating，BG）[25-28]、定向耦合器（Directional Coupler，DC）[29-46] 以及亚波长光栅波导（Subwavelength Grating Waveguide，SWG）[47-56]等。我们以 MMI 和弯曲 DC 为例，阐述 PBS 的工作原理。图 1 是 MMI 型 PBS 的示意图，其原理是利用 TE/TM 偏振态的自成像长度不相等，通过选择器件长度为 TE 和 TM 偏振的自成像长度的公倍数，使得不同偏振最后在不同的输出波导成像，从而达到偏振分离的目的。这就需要 TE 和 TM 偏振态的自成像的拍长 L_π^{TE} 和 L_π^{TM} 满足以下关系：$(2m-1)L_\pi^{\mathrm{TM}}=2nL_\pi^{\mathrm{TE}}$，其中 m 和 n 都是正整数。

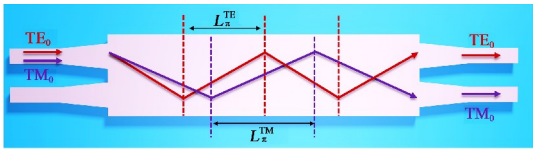


图 1　MMI 型 PBS 原理示意图

图 2 显示了基于弯曲 DC 的 PBS 示意图，利用具有不同宽度的两个弯曲波导来操控不同偏振的相位匹配条件。例如，针对其中一个偏振 TM，对波导结构参数进行优化，使得这个偏振由于相位匹配而发生强耦合，而 TE 偏振由于相位失配而发生弱耦合。通过选择合适的耦合长度，满足相位匹配的 TM 偏振将完全交叉耦合；相位失配的 TE 偏振由于模式的失配，交叉耦合受到抑制，从而达到偏振分束的目的。如图 2 所示，TM 偏振光可以完全耦合到交叉端口。另一方面，对于 TE 偏振光，由于波导的双折射，不满足相位匹配条件。因此，TE 偏振光穿过而没有任何明显的耦合。以这种方式，TE 和 TM 偏振可以在非常短的长度内分离。

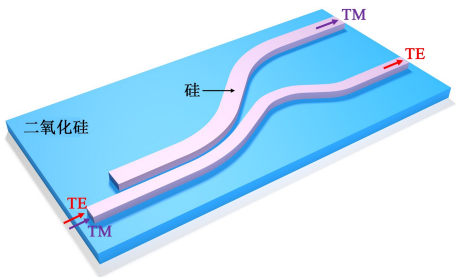


图 2　弯曲 DC 型 PBS 原理示意图

2　实现偏振分束的几种方法

2.1　多模干涉耦合器

传统的多模干涉耦合器型 PBS 是基于多模干涉的自成像，因为要满足 TE/TM 偏振的公倍数要求，器件尺寸通常较大。一般来说，为了减小 PBS 的尺寸以使其更加紧凑，m 和 n 应尽可能地小。SWG 波导可以看作是在相应区域具有均匀折射率的等效波导，利用折射率工程方法可以灵活地调控 SWG 波导的双折射和色散，以实现紧凑的高性能 PBS。因此，通过 SWG 波导的结构参数进行设计，可以使得 $m=n=1$（即 $L_\pi^{\mathrm{TM}}=2L_\pi^{\mathrm{TE}}$），如图 3 所示[18]，其在 120 nm 带宽范围内的插入损耗小于 1 dB，消光比优于 13 dB。

显然，利用 SWG 的折射率工程方法很容易实现 TM 偏振的首个自映像长度是 TE 偏振的首个自

映像长度的两倍，并且能够将整个器件的长度缩小到 100 μm 以下。然而，TM 和 TE 偏振的第一个自成像长度之间的比值具有很强的波长依赖性，从而限制了 PBS 的工作带宽。在文献[19]中提出了一种基于 MMI 结合光子晶体结构的 PBS，六边形孔状的光子晶体结构被刻蚀在 MMI 耦合器的中间，如图 4 所示[19]。这样，从端口 1 输入的 TE 偏振光被光子晶体反射，它的第一个自成像将在端口 2 中形成并通过端口 2 接收。同时，TM 偏振光可以几乎无损地通过光子晶体结构，在端口 3 形成它的第一个自成像并通过端口 3 收集。因此，MMI 耦合器的长度不再受公倍数要求的限制，器件的性能可以分别针对 TE 和 TM 偏振进行优化。该器件的长度仅为 71.5 μm，并且在 77 nm 的波长范围内，两种偏振的消光比均大于 20 dB，插入损耗小于 2 dB。

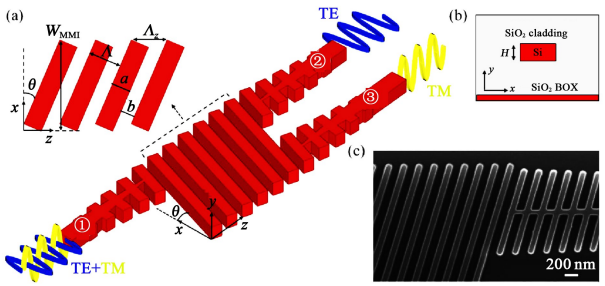


图 3 基于 SWG 的 MMI 型 PBS[18]

为了得到更小尺寸的器件，研究人员提出了一种部分覆盖金属的 MMI 型 PBS。顶部金属对 TE 偏振的影响很小，因此，TE 偏振由于多模干涉效应形成自成像并从交叉端口输出；对于 TM 偏振，顶部金属的影响导致无法激发出高阶模式，TM 偏振将从直通端口直接输出。整个器件的占用面积极小，约为 1.8 μm×2.5 μm，其缺点是带宽较小，消光比大于 10 dB 的带宽仅为 80 nm。

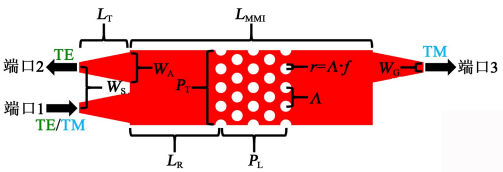


图 4 基于光子晶体辅助的 MMI 型 PBS[19]

2.2 马赫-曾德尔干涉仪

MZI 是实现波导偏振分束器的常用技术，此类 PBS 一般由两个偏振不敏感 MMI 连接而成，如图 5 所示。MMI 的作用是将 TE/TM 偏振光分为相等的两部分。MZI 的上下臂经过仔细设计，使得 TE 偏振通过时，在上下臂积累的相位相等；而当 TM 偏振通过时，两臂积累的相位差为 π。这样，不同偏振输入时，将在第二个 MMI 的不同输出端口合并输出。图 5 是常见的 MZI 型 PBS 的常见设计思路。由于采用 MMI 耦合器，MZI 型 PBS 通常具有制造公差大、损耗低的优势。缺点是尺寸通常达几百微米，且带宽小、消光比较低，不利于片上集成。

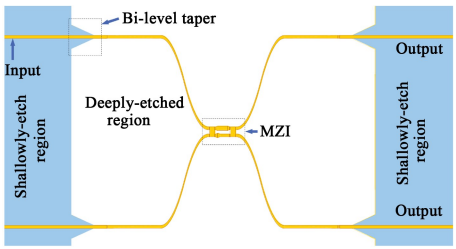


图 5 反对称 MZI 型 PBS[23]

2.3 布拉格光栅

布拉格光栅是一种有效折射率在光传播方向上周期性调制的结构，这种调制通常通过改变折射率（例如，交替变化的材料）或者波导的物理尺寸来实现。在每一个交替变化的界面处，传播的光发生发射，反射信号的相对相位由光栅周期和光的波长决定，反射信号只在一个特定波长（即布拉格波长）附近的窄带范围内进行干涉。在这个范围内，光会被强烈地反射；而在其他波长，反射的光发生相消干涉，从而形成阻带。布拉格光栅型 PBS 通常是利用光栅的 TE 阻带和 TM 阻带位于不同的中心波长处。利用布拉格光栅制作 PBS 是一种全新的思路，设计简便，并且具有超高的消光比。在文献[27]中，实验测得中心波长处的消光比在 40 dB 以上。然而，布拉格光栅通常需要设计得很长，以形成强烈的反射，整个器件的长度约为 820 μm，消光比大于 30 dB 的带宽也仅仅只有 22 nm。

除此之外，研究人员还提出了一种基于多模布拉格光栅的 PBS，如图 6 所示[28]。该 PBS 由多模布拉格光栅和一个锥形定向耦合器组成，多模布拉格光栅是针对 TE0 和 TE1 之间的强耦合设计的。对于入射的 TE0 模式，首先在多模布拉格光栅中耦合为反向传播的 TE1 模式。然后反射的 TE1 模式 TE0/TE1 模式复用器中演化为 TE0 模式，并最终在波导 B 中输出。相比文献[27]，器件的尺寸大大减小，多模波导光栅的长度约为 20 μm。在 1 577 nm 处，TE 偏振的隔离比为 31 dB，TM 偏振的偏振隔离为 34 dB，偏振隔离大于 20 dB 的带宽为 64 nm。

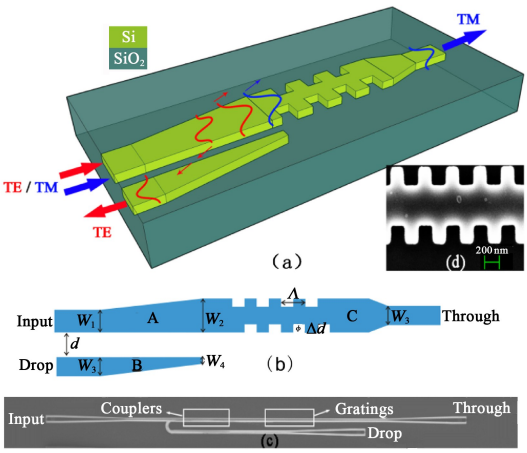


图 6　基于多模布拉格光栅的 PBS[28]

2.4　定向耦合器

基于定向耦合器的 PBS 是目前主流的设计方案之一，包括弯曲波导定向耦合和非对称定向耦合。在参考文献[42]中，研究人员提出了一种基于弯曲 DC 的 PBS，其长度仅为 10.1 μm。在 1 520～1 600 nm 的波长范围内，TE 偏振的消光比为 15 dB 左右，TM 偏振的消光比为 6～20 dB。通过适当优化耦合区域的长度，可以进一步提高 PBS 的性能。

图 7 所示是基于非对称定向耦合的 PBS[43]，由三根波导组成，波导 1，2 和 3。在图 7 中，不同的偏振从波导 1 中输入，所输入的 TM0 模式由于满足相位匹配条件，在传输的过程中逐渐耦合到波导 2 中转化为高阶模式 TM1 并在波导 2 中传输。当波导 1 中的 TM0 模式全部转换为波导 2 中的 TM1 模式时，波导 1 通过弯曲波导与波导 2 分离，从而防止波导 2 中的 TM1 模式重新耦合到波导 1 中。同时，由于满足相位匹配条件，波导 2 中传输的 TM1 式耦合到波导 3 中并重新转换为 TM0 模式。对于 TE 0模式，由于相位失配，在波导1中传输的TE0

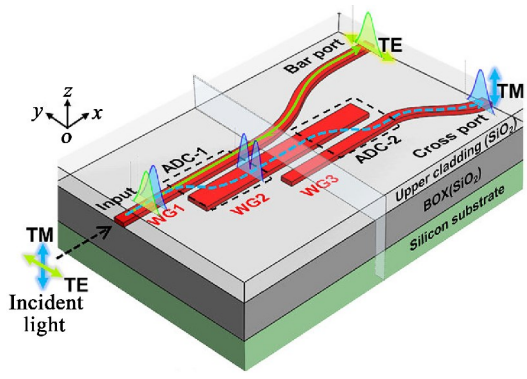


图 7　基于非对称定向耦合的 PBS[43]

模式的交叉耦合受到较强地抑制，将保留在波导 1 中继续传输。同样地，基于非对称定向耦合的 PBS 在设计时需要对各个波导的结构参数进行优化，选取合适的耦合长度以实现完全交叉耦合。对于制作的 PBS，在 80 nm 的带宽范围内，TE 偏振实现了 23 dB 的消光比，TM 偏振实现了 10 dB 的消光比。

显然，基于定向耦合的 PBS 设计简单、尺寸小，非常利于 PBS 的片上集成。并且，在设计的时候没有引入复杂的狭缝或者亚波长结构，在工艺制作上也比较容易实现。因为定向耦合本质上是波长相关的，在设计波导结构的时候一般都选取中心波长进行优化，因此在设计的中心波长处通常具有最高的偏振消光比，而在远离中心波长的两侧，偏振消光比会有所下降，从而限制了 PBS 的带宽。为了解决这个问题，基于级联弯曲定向耦合的 PBS 被提出[44]，如图 8 所示。级联后的 PBS 在带宽和偏振消光比上都有了很大的提升，不足的是，多级结构会无法避免地导致相对较大的尺寸。同时，研究人员还结合狭缝波导和锥形刻蚀波导，提出了一种超紧凑，具有超高消光比(30～40 dB)、超宽带宽的高性能 PBS。其偏振消光比大于 20 dB 的带宽约为 175 nm。

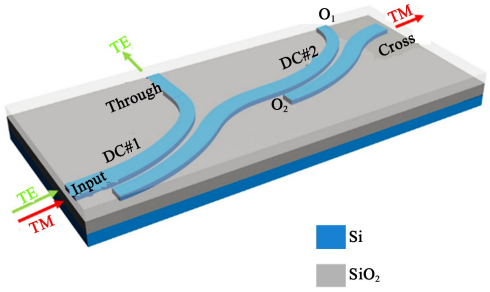


图 8　基于级联弯曲定向耦合的 PBS[44]

2.5　亚波长光栅波导

SWG 是一种由深亚波长纳米条带一维阵列形成的超材料，具有很强的各向异性和平坦的色散，在操控偏振方面表现出很大的潜力[47-56]。随着工艺制造水平的不断进步，诸如 SWG 的小尺寸结构有着很大的发展前景。由于 SWG 波导的双折射和色散可以被灵活地调控，基于 SWG 设计出来的 PBS 通常结构紧凑、带宽大、消光比高。在文献[53-54]中，研究人员提出了 SWG 辅助型的 PBS，其大小约为几微米，并且表现出不错的带宽和消光比。

文献[55]中提出了一种使用“各向异性材料”的片上硅 PBS，其原理如图 9 所示。对于 TM 偏振，折射率在 AM[100]和 AM[010]中均为 n_o，此时整

个器件可以看成 MMI 耦合器，并在交叉端口输出 TM 偏振。而对于 TE 偏振，折射率在 AM[100]和 AM[010]中分别为 n_o/n_e，此时整个器件可以看成两根完全独立的波导，入射的 TE 偏振在直通端口输出并且几乎没有任何交叉耦合。所制备的 PBS 面积仅有 12.3 μm×1.9 μm，在大于 200 nm 的工作带宽范围内，插损小于 1 dB，偏振消光比大于 20 dB。同时，通过引入级联 SWG 辅助双核绝热锥形结构[56]，提出并实现了具有高性能超宽带 PBS。每一个双核绝热锥形结构由一个条形波导和 SWG 组成。根据模式演化理论，从输入波导中发射的 TE0 在 SWG 中被有效地转化为 TE0 模式，最后在交叉输出波导中转化为 TE0 模式输出。而对于输入的 TM0 模式，几乎不会发生模式演化，因而 TM0 模式从直通波导输出。该 PBS 的模式演化区域长度为 33.6 μm。理论上，在 270 nm 的超宽带范围内，TE 和 TM 的消光比在 20 dB 以上。实验测得消光比为 20 和 25 dB 的带宽分为 240 和 220 nm，1 dB 带宽为 230 nm。

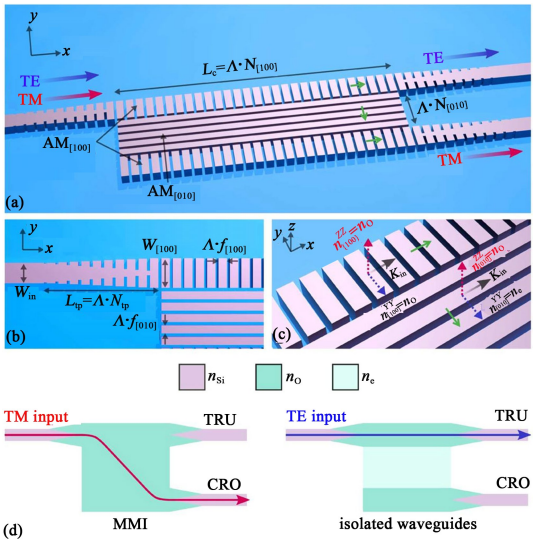


图 9 基于各向异性超材料的 PBS[55]

2.6 各类 PBS 的性能比较

通过前面对各种类型 PBS 的介绍，我们了解了各类 PBS 的性能以及优劣势。表 1 中给出了已经报道的具有代表性的 PBS 的尺寸、损耗以及消光比。从表中可以看出，基于 MMI 和 MZI 的 PBS 通常尺寸较大、消光比低，并且带宽一般都不是很大，不适用于需要高消光比、大带宽的场景。基于 BG 的 PBS 有足够的消光比，然而其带宽很窄，通常只有几十个纳米。基于 DC 的 PBS 目前来说拥有不错的性能，并且其尺寸小、工艺容差大，适用于大多数场景。并且随着 SWG 和狭缝波导的发展，这些 PBS 的结构愈加紧凑，达到 10 μm 左右。

表 1 各种类型 PBS 性能比较

文献	结构	尺寸/μm	插入损耗/dB TE/TM	消光比/dB TE/TM	带宽/nm TE/TM
[13]	MMI	3×102.1	0.7/0.1	>16/>16	60/60
[17]	MMI	<100	1.9/2.5	>14.5/>11.7	84/84
[18]	MMI	NA	1/1	>13/>13	120/120
[19]	MMI	71.5	<2/<2	>20/>20	77/77
[23]	MZI	~200	NA/NA	>10/>10	40/40
[27]	BG	~820	~1.1/~1.1	>30/>30	22/22
[28]	BG	~22	NA/NA	>20/>20	64/64
[32]	级联弯曲 DC	6.9×20	<0.35/<0.35	>30/>30	70/70
[36]	弯曲 DC	26	0.8/0.3	>30/>30	90/70
[40]	DC	2.2×15	<0.71/<0.51	>13/>13	80/80
[43]	DC	112	NA/NA	~23/~10	80/80
[45]	级联弯曲 DC	10×48	~0.5/~0.5	>20/>15	120/120
[46]	狭缝 DC	11	~0.17/~0.22	>25/>25	120/120
[50]	SWG	4.6	<1/<1	>10/>10	420/420
[52]	SWG	14.6	0.1/0.11	>10/>10	175/115
[54]	SWG	~2	0.2~2.6/0.3~2.8	>15/>20	60/60
[55]	SWG	12.25×1.9	<1/<1	>20/>20	200/200
[56]	SWG	33.6	<1/<1	~25/~25	220/220

3 偏振分束器的应用

3.1 片上偏振分集

硅纳米线波导作为超小型光子电路的平台具有很大的潜力[57]。巨大的折射率差导致它们的弯曲半径非常小，通常只有几微米，这使得它们在构建超小型集成光子器件方面有很大的优势[58-60]。同时，较为显著的双折射效应也会带来不小的问题，例如偏振模色散、偏振相关损耗以及偏振波长依赖性等。为解决这个问题，最直接的方法就是设计偏振无关的器件。理论上，通过对脊波导的脊宽和脊高进行精确地控制，可以使得 TE 和 TM 偏振的有效折射率几乎相等，从而使得波导器件偏振无关。然而，这对于商用的顶部硅厚度为 220 或者 340 nm 的 SOI 来说，几乎是不可能实现的。一方面，对于硅纳米线波导来说，其制造误差通常在十纳米量级，当波导长度比较大时，会带来不小的影响。例如，当波导长度为 5 cm 时，高度为 300 nm、宽度为(300±5) nm 的两个波导之间的差分群延迟达到 6.6 ps，这对于通信系统来说是极为不利的。另一方面，由应力引起的双折射也很难消除。较为完美的解决方案就是在片上使用偏振分集方案。如图 10 所示[61]，TE 和 TM 偏振首先由 PBS 分离，分成两路传输。接下

来，TM 偏振由偏振旋转器转变为 TE 偏振，两路光均为 TE 偏振。这样，我们仅仅只需要针对 TE 偏振设计器件。这两路光通过这些器件后最终进行组合并耦合到输出光纤输出。

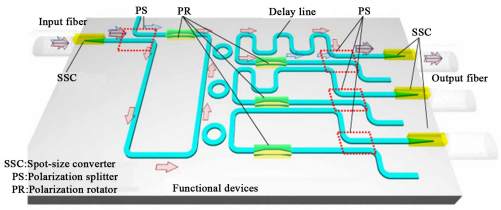


图 10　片上偏振分集方案[61]

3.2　片上偏振复用-波分复用系统

先进的多路复用技术在满足不断增长的通信容量需求方面发挥着非常重要的作用[62-65]。特别是波分复用(WDM)技术，它使单根光纤能够同时传输多个波长通道，极大提高了通信系统的容量，是目前最成功的技术之一。除了 WDM 技术之外，目前已经开发了多种复用技术。例如空分复用(SDM)[64]、模式分复用(MDM)[66]以及偏振分复用(PDM)[67]。这些技术不仅可以节省物理空间，还可以降低系统成本。对于 WDM 来说，理论上通过减小通道中的波长间隔或者增加带宽以实现更多的波长通道是可以实现的。但是一方面，光波导器件和掺铒光纤放大器的有限带宽限制了 WDM 的可用波段。另一方面，当波长通道太多时，波长管理变得复杂，系统成本也大大增加。因此，通过增加波长通道来达到增大通信容量的目的并非是一个很好的选择。

一种可替代的方案就是使用混合复用技术，以满足片上光互连的传输容量不断增长的需求。例如 PDM-WDM 混合复用技术，输入信号光首先被 PBS 分为两个偏振光(即TE和TM)，然后分别进入两个阵列波导光栅(AWG)；最后，通过双偏振和 N 个波长通道实现 $2N$ 个通道。这种方案的缺点是需要分别设计用于 TE 和 TM 偏振的 AWG，并且由于制造误差，难以使两个 AWG 对所有通道具有相同的波长对准。一种可替代的方案是使用包括 PBS 和 PR 的偏振分集技术。利用这种方案，其中一个偏振被旋转，使得两组信号具有相同的偏振状态，因此仅需要用于一个偏振的 AWG。如图 11 所示[68]，就是将 AWG、PBS 和 PR 结合的 PDM-WDM 混合复用技术，以 9 个波长实现了 18 个通道的混合多路复用。器件的占地面积为 530 μm×210 μm，信道间的串扰约为−13 dB，插入损耗为 7 dB 左右。

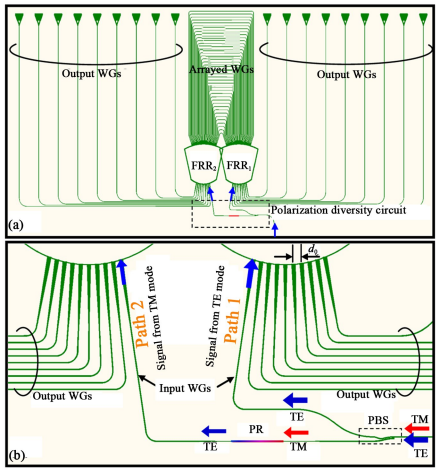


图 11　基于 AWG 的片上 PDM-WDM 复用系统[68]

3.3　片上偏振复用-模式复用系统

除了 PDM-WDM 混合复用技术之外，还可以引入高阶模式，实现偏振-模式混合复用系统。在图 12 中[69]，展示了一种通过级联双核绝热锥形结构实现的双偏振 10 个通道的 PDM-MDM 混合复用技术。模式复用器的总线波导宽度为 2.3 μm，支持6

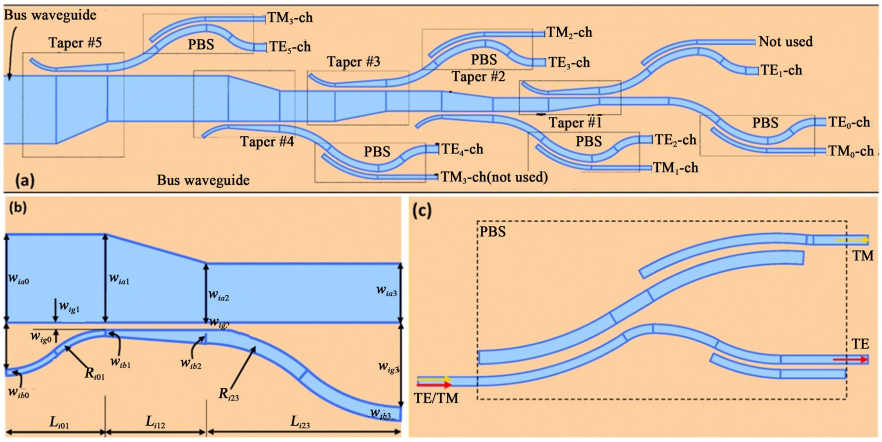


图 12　片上 PDM-MDM 复用系统[69]

个 TE 模式和 4 个 TM 模式。10 个通道模式(解)复用器由五个级联的双核绝热锥形结构和六个 PBS 构成。通过双核绝热锥形结构将宽波导内的高阶模式转变为窄波导内的 TE/TM 基模,得到的 TE 和 TM 基模再经过 PBS 进行分离,以形成模式(解)复用系统。测试的结果显示 TE 和 TM 模式通道的串扰都较小(−15～−25 dB),插入损耗低至 0.2～1.8 dB。该 PDM-MDM 混合复用技术与 WDM 技术兼容,非常适合于高容量片上光互连系统。

4 结论

基于硅基平台的片上 PBS 在近几年得到飞速发展。其尺寸大幅度缩减,消光比进一步提高,带宽也进一步增大。得益于不断进步的工艺制造水平,这些器件的性能得到显著改善。本文总结了各类 PBS 的原理,对这些 PBS 的尺寸、消光比以及带宽等性能进行了比较,并总结了 PBS 在解决未来通信容量危机方面的应用。其在未来有望成为片上多种混合复用技术的关键器件。

参考文献:

[1] Dong P, Chen Y K, Duan G H, et al. Silicon photonic devices and integrated circuits[J]. Nanophotonics, 2014, 3(4-5): 215-228.

[2] Bogaerts W, Chrostowski L. Silicon photonics circuit design: Methods, tools and challenges[J]. Laser & Photonics Review, 2018, 12(4): 1700237.

[3] Soref R A, Schmidtchen J, Petermann K. Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO_2[J]. IEEE J. of Quantum Electronics, 1991, 27(8): 1971-1974.

[4] Dai D, He S. Analysis of characteristics of bent rib waveguides[J]. J. of the Optical Society of America A, 2004, 21(1): 113-121.

[5] Marchetti R, Lacava C, Khokhar A, et al. High-efficiency grating-couplers: demonstration of a new design strategy[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 16670.

[6] Hong J, Spring A M, Qiu F, et al. A high efficiency silicon nitride waveguide grating coupler with a multilayer bottom reflector[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 12988.

[7] Daniel B, Carlos A R, Diego P G, et al. L-shaped fiber-chip grating couplers with high directionality and low reflectivity fabricated with deep-UV lithography[J]. Opt. Lett.. 2017, 42(17): 3439-3442.

[8] 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(18): 4206-4209.

[9] Rouifed M S, Littlejohns C G, Guo X T, et al. Ultra-compact MMI-based beam splitter demultiplexer for the NIR/MIR wavelengths of 1.55 μm and 2 μm[J]. Opt. Express, 2017, 25: 10893-10900.

[10] Chen G Y, Ng J D, Lin H L, et al. Design and fabrication of high-performance multimode interferometer in lithium niobate thin film[J]. Opt. Express, 2021, 29: 15689-15698.

[11] Shiran H. Dual-mode broadband compact 2×2 optical power splitter using sub-wavelength metamaterial structures[J]. Opt. Express, 2021, 29: 23864-23876.

[12] Fukuda H, Yamada K, Tsuchizawa T, et al. Silicon photonic circuit with polarization diversity[J]. Opt. Express, 2008, 16(7): 4872-4880.

[13] Hassan S, Chack D, Mahajan V. High extinction ratio and low loss polarization beamsplitter based on multimode interference for PICs[J]. Appl. Opt., 2020, 59(11): 3369-3375.

[14] Bermello A H, Gonzalez J M L, Velasco A, et al. Design of a broadband polarization splitter based on anisotropy-engineered tilted subwavelength gratings[J]. IEEE Photonics J., 2019, 11(3): 1-8.

[15] Wei Y, Yue X, Li Y, et al. A compact and wide-band polarization beam splitter based on wedge-shaped MMI coupler in silicon-on-insulator[C]// 2015 Optical Fiber Communication Conference and Exhibition, 2015, W2A. 12.

[16] Sun X, Aitchison J S, Mojahedi M. Realization of an ultra-compact polarization beam splitter using asymmetric MMI based on silicon nitride/silicon-on-insulator platform[J]. Opt. Express, 2017, 25(7): 8296-8305.

[17] Xu L, Wang Y, Kumar A, et al. Polarization beam splitter based on MMI coupler with SWG birefringence engineering on SOI[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2018, 30(4): 403-406.

[18] Herrero A, Ponte A D, Luque-González J M, et al. Experimental demonstration of metamaterial anisotropy engineering for broadband on-chip polarization beam splitting [J]. Opt. Express, 2020, 28(11): 16385-16393.

[19] Xu L H, Wang Y, El-Fiky E, et al. Compact broadband polarization beam splitter based on multimode interference coupler with internal photonic crystal for the SOI platform [J]. J. of Lightwave Technol., 2019, 37(4): 1231-1240.

[20] Guan X, Wu H, Shi Y, et al. Extremely small polarization beam splitter based on a multimode interference coupler with a silicon hybrid plasmonic waveguide[J]. Opt. Lett., 2014, 39(2): 259-262.

[21] Lin Z, Chen K, Huang Q, et al. Ultra-broadband polarization beam splitter based on cascaded Mach-Zehnder interferometers assisted by effectively anisotropic structures [J]. IEEE Photonics J., 2021, 13(1): 4500209.

[22] Liang T K, Tsang H K. Integrated polarization beam splitter in high index contrast silicon-on-insulator waveguides[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2005, 17(2): 393-395.

[23] Dai D, Zhi W, Peters J, et al. Compact polarization beam splitter using an asymmetrical Mach-Zehnder interferometer based on silicon-on-insulator waveguides[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012, 24(8): 673-675.

[24] Dai D, Zhi W, Bowers J E. Considerations for the design of asymmetrical Mach-Zehnder interferometers used as polarization beam splitters on a submicrometer silicon-on-insulator platform[J]. J. of Lightwave Lett., 2011, 29(12): 1808-1817.

[25] Qiu H, Chen L, Wang Y, et al. Polarization beam splitter based on strong anti-symmetric multimode Bragg gratings [C]// 2017 Asia Communications and Photonics Conf. (ACP). IEEE, 2017: S3D. 7.

[26] Zhang Y, He Y, Wu J, et al. High-extinction-ratio silicon polarization beam splitter with tolerance to waveguide width and coupling length variations[J]. Opt. Express, 2016, 24(6): 6586-6593.

[27] Zhan J, Brock J, Veilleux S, et al. Silicon nitride polarization beam splitter based on polarization-independent MMIs and apodized Bragg gratings[J]. Opt. Express, 2021, 29(10): 14476-14485.

[28] Qiu H, Jiang J, Yu P, et al. Broad bandwidth and large fabrication tolerance polarization beam splitter based on multimode anti-symmetric Bragg sidewall gratings[J]. Opt. Lett., 2017, 42(19): 3912-3915.

[29] Wu S B, Zhao Z, Feng T, et al. Compact cross-slot waveguide polarization beam splitter using a sandwich-type coupler[J]. Appl. Opt., 2020, 59(5): 1447-1453.

[30] Li C, Dai D. Compact polarization beam splitter based on a three-waveguide asymmetric coupler with a 340-nm-thick silicon core layer[J]. J. of Lightwave Technol., 2018, 36(11): 2129-2134.

[31] Ma Y Q, Farrell G, Semenova Y, et al. Low loss, high extinction ration and ultra-compact plasmonic polarization beam splitter[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2014, 26(7): 660-663.

[32] Wu H, Ying T, Dai D. Ultra-broadband high-performance polarizing beam splitter on silicon[J]. Opt. Express, 2017, 25(6): 6069-6075.

[33] Chen W W, Zhang B, Wang P, et al. Ultra-compact and low-loss silicon polarization beam splitter using a particle-swarm-optimized counter-tapered coupler[J]. Opt. Express, 2020, 28(21): 30701-30709.

[34] Dai D X, Wang Z, Bowers J E. Ultrashort broadband polarization beam splitter based on an asymmetrical directional coupler[J]. Opt. Lett., 2011, 36(13): 2590-2592.

[35] Lou F, Dai D, Wosinski L. Ultracompact polarization beam splitter based on a dielectric-hybrid plasmonic-dielectric coupler[J]. Opt. Lett., 2012, 37(16): 3372-3374.

[36] Ong J R, Ang T Y L, Ezgi S, et al. Broadband silicon polarization beam splitter with a high extinction ratio using a triple-bent-waveguide directional coupler[J]. Opt. Lett., 2017, 42(21): 4450-4453.

[37] Kim Y, Hyeok L M, Yudeuk K, et al. High-extinction-ratio directional-coupler-type polarization beam splitter with a bridged silicon wire waveguide[J]. Opt. Lett., 2018, 43(14): 3241-3244.

[38] Yin S J, Qiu H Q, Wang Z B, et al. On-chip silicon switchable polarization beam splitter[J]. Opt. Lett., 2022, 47(4): 961-964.

[39] Huang J, Yang J, Chen D, et al. Ultra-compact broadband polarization beam splitter with strong expansibility[J]. Photonics Research, 2018, 6(6): 574-578.

[40] Shi X D, Zhang J, Fan W, et al. Compact low-birefringence polarization beam splitter using vertical-dual-slot waveguides in silicon carbide integrated platforms[J]. Photonics Research, 2022, 10(1): A8-A13.

[41] Cheng Z, Wang J, Huang Y, et al. Realization of a compact broadband polarization beam splitter using the three-waveguide coupler[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2019, 31(22): 1807-1810.

[42] Wang J, Liang D, Tang Y, et al. Realization of an ultra-short silicon polarization beam splitter with an asymmetrical bent directional coupler[J]. Opt. Lett., 2013, 38(1): 4-6.

[43] Bhandari B, Im C, Sapkota O R, et al. Highly efficient broadband silicon nitride polarization beam splitter incorporating serially cascaded asymmetric directional couplers[J]. Opt. Lett., 2020, 45(21): 5974-5977.

[44] Zhao N, Qiu C, He Y, et al. Broadband polarization beam splitter by using cascaded tapered bent directional couplers [J]. IEEE Photonics J., 2019, 11(4): 1-8.

[45] Dai D X, Liu X, Liu D. Silicon polarization beam splitter at the 2 μm wavelength band by using a bent directional coupler assisted with a nano-slot waveguide[J]. Opt. Express, 2021, 29(2).

[46] Ye T, Qiu J, Chang L, et al. Compact polarization beam splitter with a high extinction ratio over S+C+L band[J]. Opt. Express, 2019, 27(2): 999.

[47] Huang T Y, Xie Y, Wu Y H, et al. Compact polarization beam splitter assisted by subwavelength grating in triple-waveguide directional coupler[J]. Appl. Opt., 2019, 58(9): 2264-2268.

[48] Yang J Y, Dong Y, Xu Y, et al. Broadband and high-extinction-ratio polarization beam splitter on tilted subwavelength gratings waveguides[J]. Appl. Optics, 2020, 59(25): 7705-7711.

[49] Dai S J. Compact and broadband silicon-based polarization beam splitter using asymmetric directional couplers embedded with subwavelength gratings and slots[J]. Appl. Opt., 2022, 61(1): 126-134.

[50] Mao S M, Cheng L, Zhao C, et al. Ultra-broadband and

ultra-compact polarization beam splitter based on a tapered subwavelength-grating waveguide and slot waveguide[J]. Opt. Express, 2021, 29(18): 28066-28077.

[51] Zhang J J, Shi X D, Zhang Z J, et al. Ultra-compact, efficient and high-polarization extinction-ratio polarization beam splitters based on photonic anisotropic metamaterials [J]. Opt. Express, 2022, 30(1): 538-549.

[52] Liu L, Deng Q, Zhou Z. Manipulation of bent length and wavelength dependence of a polarization beam splitter using a subwavelength grating[J]. Opt. Lett., 2016, 41(21): 5126-5129.

[53] Xu Y, Xiao J. Compact and high extinction ratio polarization beam splitter using subwavelength grating couplers[J]. Opt. Lett., 2016, 41(4): 773-776.

[54] Li C L, Dai D. Compact polarization beam splitter for silicon photonic integrated circuits with a 340-nm-thick silicon core layer[J]. Opt. Lett., 2017, 42(21): 4243-4246.

[55] Xu H N, Dai D, Shi Y. Ultra-broadband and ultra-compact on-chip silicon polarization beam splitter by using hetero-anisotropic metamaterials [J]. Laser & Photonics Rev., 2019, 13: 1800349.

[56] Li C L, Li C, Zhang M, et al. Ultra-broadband polarization beam splitter with silicon subwavelength-grating waveguides [J]. Opt. Lett., 2020, 45(8): 2259-2262.

[57] Tsuchizawa T, Yamada K, Fukuda H, et al. Microphotonics devices based on silicon microfabrication technology [J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(1): 232-240.

[58] Ni B, Xiao J B. Ultracompact silicon-based wavelength diplexer for 1.55/2 μm using subwavelength gratings[J]. Opt. Lett., 2019, 44(11): 2775-2778.

[59] Lu X H, Wang Y, Mao D, et al. Broadband 1 310/1 550 nm wavelength demultiplexer based on a multimode interference coupler with tapered internal photonic crystal for the silicon-on-insulator platform[J]. Opt. Lett., 2019, 44(7): 1770-1773.

[60] Liu D J, Zhang L, Jiang H, et al. First demonstration of an on-chip quadplexer for passive optical network systems[J]. Photonics Research, 2021, 9(5): 757-763.

[61] Fukuda H, Yamada K, Tsuchizawa T, et al. Silicon photonic circuit with polarization diversity [J]. Opt. Express, 2008, 16(7): 4872-4880.

[62] Uden R G H, Correa R A, Lopez E A, et al. Ultra-high-density spatial division multiplexing with a few-mode multicore fibre[J]. Nature Photonics, 2014, 8: 865-870.

[63] Winzer P J, Peter J. Making spatial multiplexing a reality [J]. Nature Photonics, 2014, 8: 345-348.

[64] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E, et al. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. Nature Photonics, 2013, 7: 354-362.

[65] Zhao N B, Li X, Li G, et al. Capacity limits of spatially multiplexed freespace communication[J]. Nature Photonics, 2015, 9: 822-826.

[66] Luo L W, Ophir N, Chen C P, et al. WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip [J]. Nature Communication, 2013, 5: 3069.

[67] Chen Z Y, Yan L S, Yan P, et al. Use of polarization freedom beyond polarization-division multiplexing to support high-speed and spectral-efficient data transmission[J]. Light Science & Applications, 2017, 6(2): e16207.

[68] Chen S T, Shi Y, He S, et al. Compact monolithically-integrated hybrid (de) multiplexer based on silicon-on-insulator nanowires for PDM-WDM systems [J]. Opt. Express, 2015, 23(10): 12840-12849.

[69] Dai D X, Li C, Wang S, et al. 10-channel mode (de) multiplexer with dual polarizations[J]. Laser & Photonics Rev., 2018, 12: 1700109.

作者简介:

程光炼(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为硅基光子学、非线性光学、特种光纤波导和中红外光子学;

沈　力(1989—),男,博士,副教授,主要研究方向为硅基光子学、非线性光学、特种光纤波导和中红外光子学。