



硅基片上复用—解复用技术与器件

戴道铤,王 健,陈思涛

(浙江大学光电科学与技术学院 杭州 310058)

摘 要:近年来,随着云计算、数据中心的迅速发展,光互连凭借其在功耗、速度和带宽等方面具有电互连无可比拟的诸多优势,获得越来越多的关注。为了充分发挥光互连带宽优势,发展波分复用(WDM)、偏振复用(PDM)以及模式复用(MDM)等技术是一种有效途径。而将多种复用方式综合运用则可形成一种多维混合复用技术,从而显著提升光互连通道数量和传输容量。鉴于片上集成(解)复用器是实现多通道并行传输复用系统的关键器件,着重介绍总结了基于硅光子技术实现的超小型片上集成(解)复用器件的进展,包括 WDM、PDM、MDM 复用—解复用器件以及混合复用—解复用器件。

关键词:硅波导;波分复用器;偏振复用;模式复用

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015281

Silicon-Based-Chip Multiplexing Technologies and Devices

Dai Daoxin, Wang Jian, Chen Sitao

(College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: As the demands of the data communications increase quickly for the applications of cloud-computing as well as data centers, optical interconnects have been very attractive because of the unique advantages on the aspects of low power consumption, high speed and large bandwidth. It is effective to enhance the link capacity by utilizing multiplexing technologies like wavelength-division-multiplexing (WDM), polarization-division-multiplexing (PDM), as well as mode-division-multiplexing(MDM). It will become very useful when these multiplexing technologies are combined to work together as a hybrid multiplexing technology. Definitely the multiplexer is one of the most important devices for a multiplexed optical interconnect link. A review for the recent progress of ultracompact on-chip multiplexers was given, including WDM devices, PDM devices, MDM devices, and hybrid multiplexers.

Key words: silicon photonic nanowire, wavelength division multiplexing, polarization division multiplexing, mode division multiplexing

1 引言

以 CMOS 技术为支撑的集成电路(IC)按照摩尔定律趋势已持续发展了半个多世纪,微处理器性能得到了前所

未有的提高。而随着 CMOS 工艺特征尺寸的减小,传统电互连在物理层面的诸多缺点逐渐凸显^[1];电子线路寄生电容的充放电导致功耗成倍地增加;寄生电容引起的时延也成为进一步提升传输速度的巨大障碍(单通道速率< 25 Gbit/s)^[2];

收稿日期:2015-08-30;修回日期:2015-10-13

论文引用格式:戴道铤,王健,陈思涛. 硅基片上复用—解复用技术与器件. 电信科学,2015281

Dai D X, Wang J, Chen S T. Silicon-based-chip multiplexing technologies and devices. Telecommunications Science, 2015281

超密集电子线路引发的电阻增加导致散热也成为是一个非常关键问题。为降低功耗和散热、提升处理器运算性能,基于并行计算的多核技术随之兴起。随着处理器芯片数量的日益增长,系统对片间及片上互联的数据传输速度及带宽提出了越来越高的要求。以超级计算机为例,Corona 架构的处理器包含 256 个芯片,以实现 10 TFLOP(每秒浮点运算次数,亦称每秒峰值速度)的峰值性能,对于每浮点运算的带宽要求就达到 10 Tbit/s^[3]。此时,传统电互连已难以满足这种片上数据传输带宽需求。

众所周知,光是一种具有超高频率的电磁波,作为载波可以实现超高速信号传输。为了实现超大容量片上光互连网络,除了采用超高速光调制器/光探测器等技术提升单通道比特率外,引入先进复用技术实现多通道并行传输也是其关键^[4,5]。特别地,光具有波长、偏振、模式等多个维度参量,可分别发展波分复用(WDM)、偏振复用(PDM)以及模式复用(MDM)等技术,为实现大容量、高速率、低能耗、低成本的数据传输提供了有力支撑。而且,将多种复用方式综合运用还可形成多维混合复用技术,从而进一步显著提升光互连通道数量和传输容量,这也正是光互联的另一个电互联无可比拟的优势,也正是其未来发展趋势^[5]。目前 WDM、PDM 以及 MDM 等均已成功应用于长距离数据传输^[6],并不断向短距离数据传输推进。据 IBM 预计,2020 年左右即有望实现片上光互连,突破电互联瓶颈问题,进而取代电互连成为片上和片间数据高速传输的主要方式。

值得注意的是,尽管一些复用技术在长距离光纤通信中运用非常纯熟,但过于复杂昂贵的复用技术并不适用于片上光互连系统。例如,WDM 是一种已成功应用到长距离光纤通信系统且发挥着不可替代作用的复用技术。因此,将 WDM 技术引入片上光互连系统被视为顺理成章,是当前片上光互连的研究重点之一^[7]。但考虑到系统成本及复杂度等因素,并不适合于引入过多的波长通道。另一方面,片上光互连中信号传输媒介是具有出色偏振/模式保持能力的平面光波导,使得一些复用技术的实现更为简便,如新近兴起的利用模式正交性实现单波长—多通道传输的模式复用技术。

由此可见,片上光互连复用技术具有诸多独特之处,相关研究已成为领域热点。对于片上多通道复用光互连系统,片上集成(解)复用器是其关键器件之一。在众多光子集成器件材料体系中,硅材料以其 CMOS 兼容性和高集成度等独特优势赢得了业界青睐,相关研究取得重要进展并

形成了“硅光子学”方向,并使得硅基单片大规模光子集成成为可能,为实现低成本、低能耗、多功能的光电子芯片提供有利条件。硅基光子集成器件及芯片将在光通信等领域发挥重要作用已成为业界的共识^[8-10]。为此,本文着重总结和讨论了基于硅光子技术实现的超小型片上集成(解)复用器件的进展,主要包括:基于阵列波导光栅、微环阵列等结构的超小型波分复用器件^[11-12];结构简单、易于扩展的基于级联非对称耦合器结构的多通道模式复用器件^[13-16];用于实现模式—偏振、偏振—波长、波长—模式混合复用技术的混合复用器件^[17]。

2 片上复用技术与器件

硅纳米线波导超高折射率差,其横截面尺寸一般仅为 220 nm×500 nm,具有超强光场限制能力,且最小弯曲半径可达 2 μm,为实现超小尺寸集成光子器件(包括各种复用器件)提供了基础保障。

2.1 波分复用器

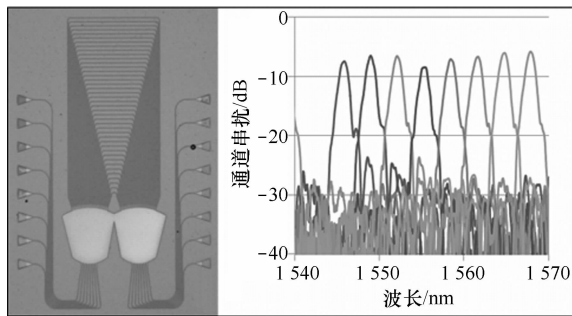
波分复用技术是利用多个不同波长的光,在单根光纤/波导上的多通道数据实现并行传输,极大地拓展了已光互连的通信容量,因而在长距离光通信系统中获得了极大成功,得到了广泛应用。其关键功能是如何将不同波长携带的多路数据合并或分开,对应的关键器件即波分复用器件。

实现波分复用器件的基本原理是利用光束干涉,可分为双光束干涉和多光束干涉两大类。相比于双光束干涉器件(如马赫—曾德尔干涉仪),多光束干涉器件可实现更窄带宽的滤波,易于实现多通道密集波长复用。最常见的多光束干涉波分复用器件主要有阵列波导光栅(AWG)、刻蚀衍射光栅(EDG)、微环谐振器(MRR)等。其中,AWG、EDG 从结构和原理上颇为相似,可实现并行多通道;而 MRR 则可通过级联结构,实现串行多通道。下面主要讨论 AWG、MRR 两种波分复用器件。

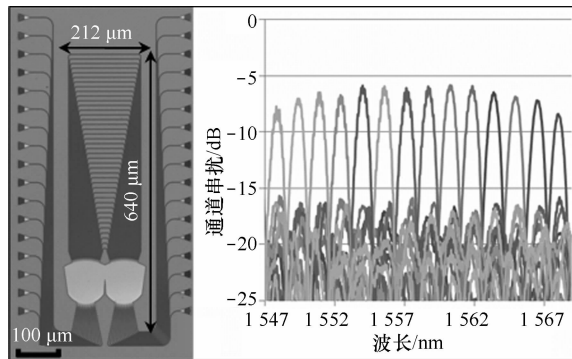
2.1.1 阵列波导光栅

图 1(a)和图 1(b)分别是通道间隔为 400 GHz、200 GHz 的常规性硅纳米线 AWG 及其测试频谱响应结果。从测试结果可见,通道间隔较大的 AWG 器件性能优良,相邻通道串扰小于 -20 dB。随着波长通道间隔减小至 200 GHz 时,AWG 器件尺寸显著增加,相应的器件性能也明显变差(例如其通道串扰增大至约 -10 dB)。因此,如何实现具有优良性能的密集型硅纳米线 AWG 器件是一个挑战。

为了解决这一问题,引入级联梳状滤波器的设计是一



(a) 通道间隔为 400 GHz



(b) 通道间隔为 200 GHz

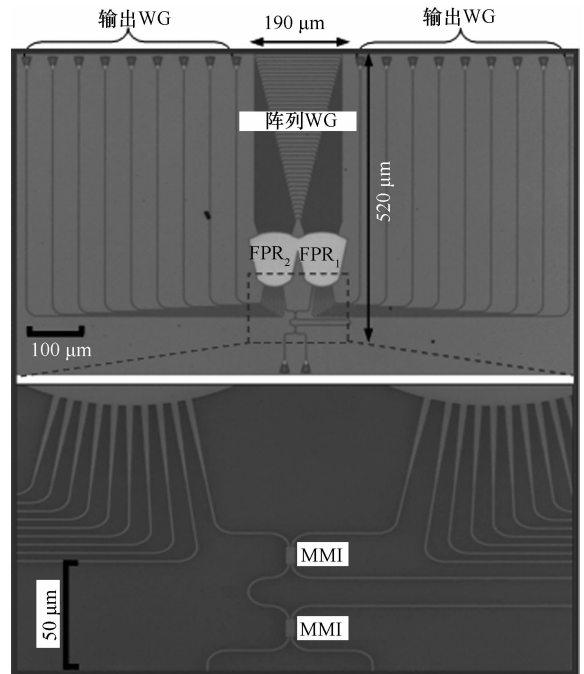
图 1 常规硅纳米线 AWG 波分复用器件及其测试频谱响应结果

种值得尝试的办法。利用梳状滤波器将输入的一组通道间隔为 $\Delta\lambda_{ch}$ 的信号 ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \dots, \lambda_N$) 分成奇数组 ($\lambda_1, \lambda_3, \lambda_5, \dots$) 和偶数组 ($\lambda_2, \lambda_4, \lambda_6, \dots$), 然后再采用两个通道间隔为 $2\Delta\lambda_{ch}$ 的波分复用器件将奇数组通道、偶数组通道各自分开。这种方法可以显著降低波分复用器件的实现难度。梳状滤波器已经在基于传统大截面 SiO_2 光波导的密集型波分复用模块中有所应用, 但鲜有关于硅纳米线梳状滤波器及其与 AWG 单片集成的报道。

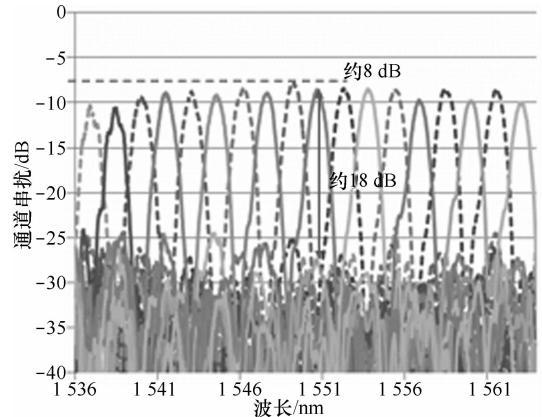
参考文献[18]首次实现了基于硅纳米线 MZI 梳状滤波器与双向型 AWG 器件的单片集成芯片, 实现了通道间隔为 200 GHz 的 18 通道密集型波分复用芯片。在此设计中, 通过合理选择 MZI 梳状滤波器的两个干涉臂光程差, 使之自由频谱范围 (FSR) $\Delta\lambda_{FSR, MZI}$ 同与之相级联的 AWG 的通道间隔 $\Delta\lambda_{ch, AWG}$ 相等, 即 $\Delta\lambda_{FSR, MZI} = \Delta\lambda_{ch, AWG} = 400 \text{ GHz}$ 。而通过利用双向型 AWG 器件, 可等效于两个 AWG 的功能, 避免了在芯片中引入两个 AWG 器件, 从而大大减小了芯片尺寸, 同时避免了由于工艺偏差而导致的两个独立 AWG 中心波长对准问题。

图 2(a) 是所研制的硅纳米线梳状滤波器与 AWG 的单片集成芯片, 其尺寸仅为 $520 \mu\text{m} \times 190 \mu\text{m}$ 。测得的奇数组、偶数组通道频谱响应如图 2(b) 所示。图 2(c) 是在同一芯片

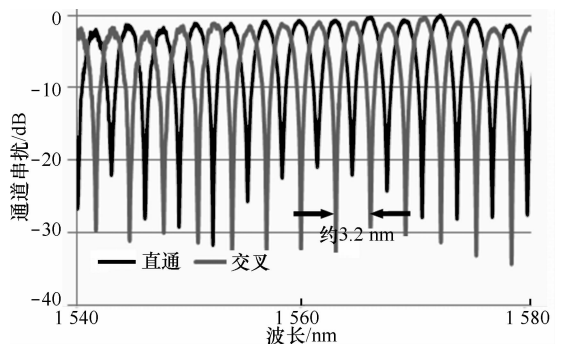
上的单个 MZI 梳状滤波器的传输特性。在此, 由于奇数组通道、偶数组通道共用同一个阵列波导光栅, 因而各通道间隔能够完美对准, 实现了通道间隔为 200 GHz 的密集波分复



(a) 硅纳米线梳状滤波器与 AWG 的单片集成芯片



(b) 奇数组、偶数组通道频谱响应测试结果



(c) 在同一芯片上的单个 MZI 梳状滤波器的传输特性

图 2 MZI 梳状滤波器特性

用功能,其相邻通道串扰约为-18 dB,与同一芯片上的单个 400 GHz AWG 的性能相当,证明了这种方法的有效性。

对于 AWG 波分复用器件,进一步减小其尺寸,不但有利于提高芯片集成度,也有利于提高器件性能。针对这一问题,已有一些关于新型 AWG 设计的报道,包括反射式 AWG。传统反射式 AWG 通常采用在波导端面蒸镀金属薄膜作为反射镜,此时要求端面表面光滑且具有很好的陡直度,因而其端面处理工艺较为复杂。而对于硅纳米线波导 AWG,由于该波导结构的超高折射率差,使得具有高反射率的超小型纯介质微反射镜及阵列成为可能,从而可直接连接于各条阵列波导末端,实现反射式 AWG 器件。这种采用纯介质微反射镜的设计可大大降低工艺复杂度,同时也使得 AWG 设计更为灵活,因此反射式硅纳米线 AWG 获得了广泛的关注^[19-21]。

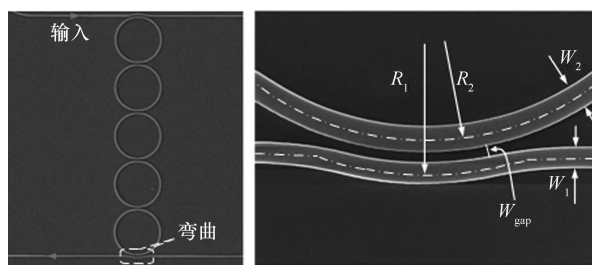
图 3(a)是一种采用光子晶体微反射镜的反射式硅纳米线 AWG^[19],其尺寸仅为 134 μm ×115 μm ,各通道的测试频谱响应如图 3(b)所示。除光子晶体微反射镜外,还可采用布拉格光栅反射镜^[20]、环型微反射镜^[21]等结构。理论上讲,这 3 种微反射镜可在较大的波长范围(>100 nm)内获得高

反射率(>90%)。但需要注意的是,对于常用的厚度为 220 nm 的 SOI 光波导,由于其 TM 偏振模具有很强的消逝场,因而很难实现可用于 TM 偏振的光子晶体(或布拉格光栅)反射镜。此时,可考虑采用具有合适弯曲半径的微腔反射镜。

2.1.2 微环谐振腔滤波器

微环谐振腔是一种可实现多种功能的经典集成光子器件,有 add-drop 型和 all-pass 型两种典型结构,广泛应用于光滤波、光调制等。对于光滤波应用,通常希望实现方型响应谱线的光滤波器,使之具有更大的容差,从而避免环境干扰所引起谐振波长漂移造成的不良影响。为实现方型滤波谱线,可采用多环级联结构,并精心设计各耦合器的耦合系数。例如,对于五环级联滤波器,各耦合系数分别为 0.45、0.09、0.05、0.05、0.09、0.45^[22]。其关键在于如何获得高达 0.45 的耦合系数。

在参考文献[22]中,采用的是多模干涉(MMI)耦合器。然而,其代价是引入了额外损耗、增加谐振腔长度($L_{\text{cm}} = 2\pi R + 2L_{\text{MMI}}$,致使其 FSR 变小),而且 MMI 耦合器的耦合系数是固定值,无法根据需要进一步调整。为克服这一问题,参考文献[23]引入了一种弯曲定向耦合器替代 MMI 耦合器,如图 4 所示。在这种结构中,应优化设计两条耦合波导宽度(W_1 、 W_2)使之满足位相匹配条件。此时,即便选取较大的耦合波导间距(如 150 nm),也可通过增加耦合区长度来获得足够大的耦合系数。从图 4(a)可见,谐振腔长 $L_{\text{cm}} = 2\pi R$,因而可获得 FSR 最大化(仅由最小弯曲半径决定)。

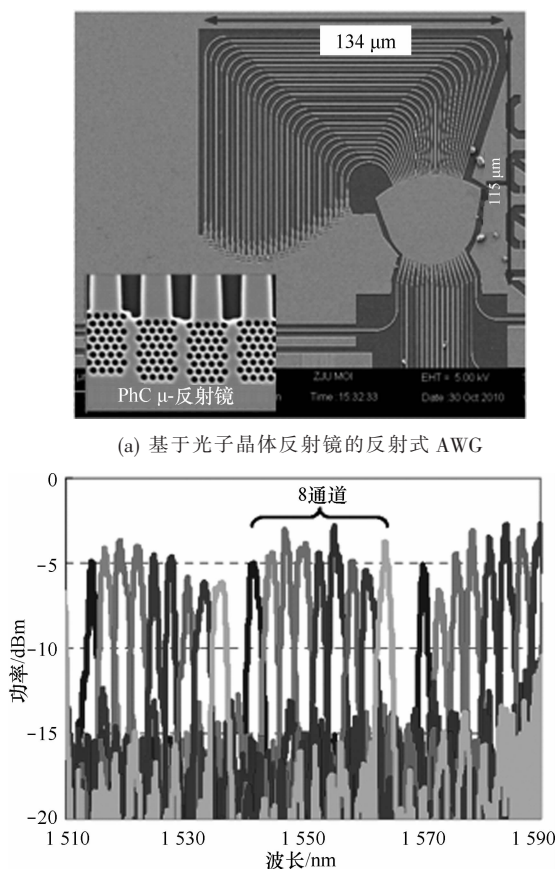


(a) 基于弯曲耦合器的五环级联滤波器

(b) 弯曲耦合器

图 4 弯曲定向耦合器^[23]

图 5 是双环、三环和五环谐振腔滤波器频谱响应测试结果及相应的仿真计算结果。很明显,随着级联微环个数的增加,其频谱响应曲线更趋近于方型,消光比也逐渐提升(分别达到 25 dB、30 dB、36 dB)。由于耦合区域附加损耗几乎为 0,所研制的多环谐振腔滤波器均具有很低的插入损耗(<1 dB)。



(a) 基于光子晶体反射镜的反射式 AWG

(b) 反射式 AWG 各通道的频谱响应测试结果

图 3 反射式 AWG 器件及频谱响应

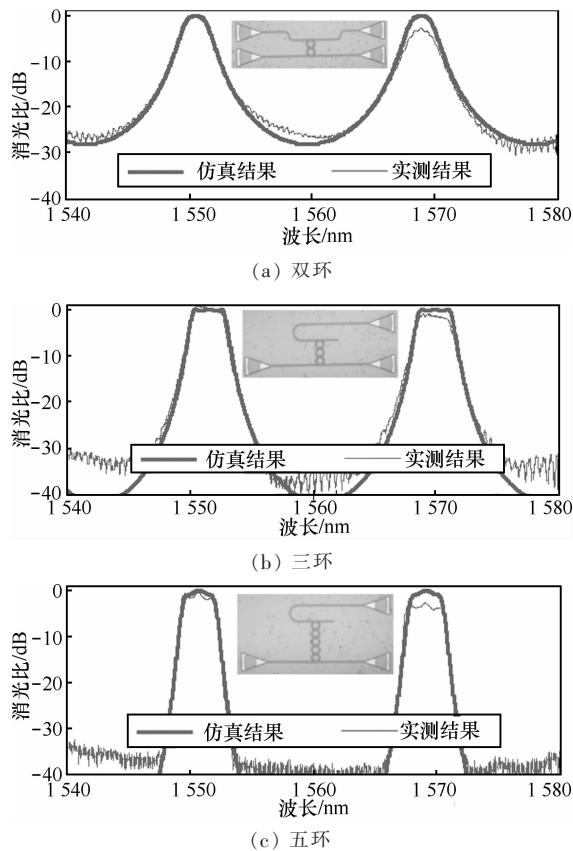


图5 多环谐振腔滤波器频谱响应测试结果及其仿真计算结果

2.2 偏振调控器件

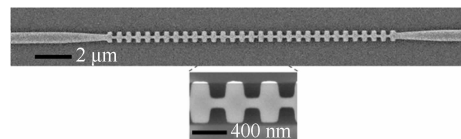
偏振态是光波的一个重要属性。在平面光波导中,一般存在 TE、TM 两种偏振模式。对于硅纳米线光波导而言,由于硅和包层(空气或 SiO_2)存在巨大折射率差,其双折射效应极为显著^[24]。因此,大多数硅纳米线光波导器件均具有非常严重的偏振敏感特性。另一方面,硅纳米线光波导的超强双折射效应也有利于实现超小尺寸片上偏振调控器件,包括起偏器、偏振分束器、偏振旋转器,可用于偏振复用系统、量子光学系统芯片等。下面着重介绍近年来发展的超小型硅基偏振调控器件。

2.2.1 起偏器

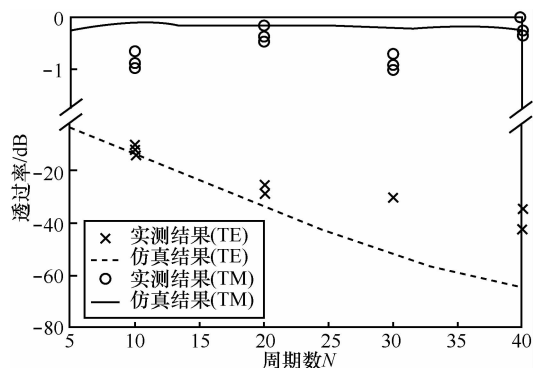
起偏器是实现线偏光的重要元件,一般可利用光波导中模场、本征损耗或者截止条件的偏振相关性来实现。

参考文献 [25] 提出了一种基于硅纳米线波导光栅的 TM 起偏器,如图 6(a)所示。此波导光栅结构针对于 TE 偏振模而设计,使得 TE 模在 1550 nm 波段具有高反射率(低透射率)特性。与之不同的是, TM 偏振模由于其有效折射率远低于 TE 偏振模,从而可以一种“布洛赫模”的形式在周期型结构中低损耗传输。图 6(b)是 TE 模、TM 模入射

时该起偏器透过率随周期数 N 的增加而变化的实验测试及理论仿真结果。结果表明, TM 偏振模的插入损耗很小(仿真结果约为 0.2 dB、实测结果 <1 dB),且随着周期数的增加几乎不变。而对于 TE 偏振,其透过率随着周期数的增加而下降。当周期数 $N < 20$ 时,实测结果与仿真结果具有较好的一致性;当周期数继续增加至 $N = 40$ 时, TE 偏振透过率的理论值 < -60 dB,其实测结果约为 -40 dB(原因是受测试系统中输入光偏振态消光比以及探测器灵敏度的限制)。



(a) 所研制的起偏器

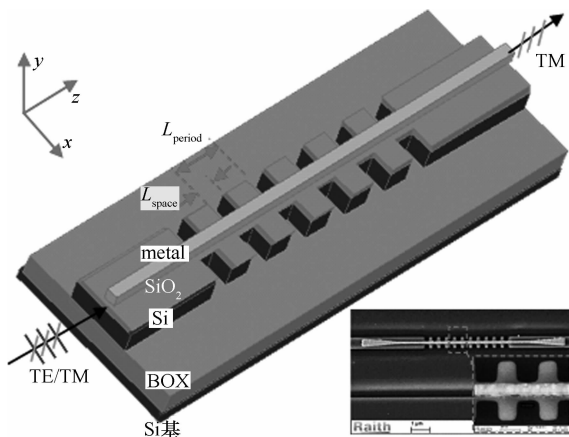


(b) 不同偏振模的透过率与周期数的关系

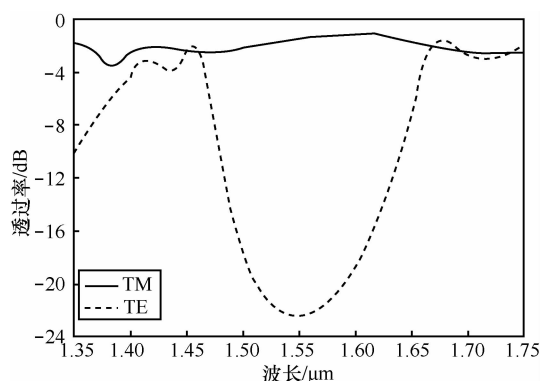
图6 所研制的起偏器及特性

除了常规硅纳米线波导,也可采用具有更强偏振相关性的混合表面等离子体波导。参考文献[26]提出一种基于顶部带有金属条的表面等离子体纳米波导光栅的 TM 型起偏器,如图 7(a)所示。在该结构中,表面等离子体波导对 TM 偏振光形成很强的约束,使之沿这由金属条确定的表面等离子体波导传播,而几乎不受光栅结构的影响。因此, TM 偏振模具有很高的透射率。与之不同的是,波导光栅对 TE 偏振模形成强烈的影响。因此,在其布拉格光栅波长附近的带宽范围内, TE 偏振模具有高反射率、低透过率特性。图 7(b)是不同入射偏振态情形下(TE 或 TM)所设计起偏器的透过谱。在此例中,相关参数为:金属条宽度为 100 nm、光栅周期为 430 nm、周期数为 11,相应的器件长度约为 $4.8 \mu\text{m}$ 。从图 7(b)可见,在中心波长 1550 nm 处该起偏器消光比和插入损耗分别为 22 dB 和 1.1 dB,而消光比 > 20 dB 的带宽达约 50 nm。

类似的,采用波导光栅也同样可以实现 TE 型起偏器^[27],如图 8 所示。在该结构中,光栅结构是通过调制硅

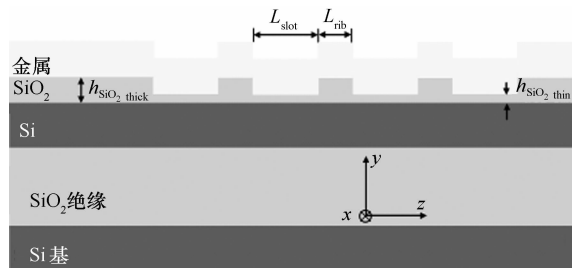


(a) 表面等离子体纳米波导光栅的 TM 型起偏器

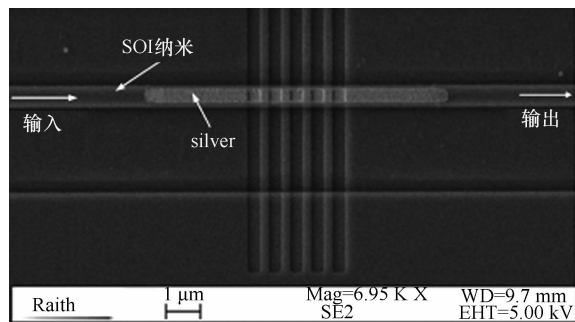


(b) 不同入射偏振态情形下(TE 或 TM)所设计起偏器的透过谱

图 7 TM 型起偏器及特性



(a) 结构设计示意



(b) 所制作器件 SEM

图 8 基于波导光栅结构的 TE 型起偏器

芯区与顶部金属薄膜之间 SiO_2 薄膜的厚度来实现。很显然,该光栅可以针对 TM 偏振来设计,使之具有高反射率。相应地,对于 TE 偏振,该光栅结构几乎没有形成任何影响。根据布拉格光栅方程,当 $\lambda=1550\text{ nm}$ 时,光栅相关参数选取为: $L_{\text{slot}}=400\text{ nm}$ 、 $L_{\text{rib}}=220\text{ nm}$ 。三维有限时域差分(FDTD)方法仿真结果表明,当取周期数 $P=5$ 时,中心波长处的消光比和插损分别为 18 dB 和 0.76 dB,可见该 TE 型起偏器具有良好的性能,而且器件尺寸仅约为 $3.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

2.2.2 偏振分束器

偏振分束器(PBS)是偏振调制系统的关键器件,用于实现 TE 和 TM 偏振的分离。人们已经采用 MMI、DC、MZI、光子晶体、AWG 等多种结构以实现 PBS^[24]。其中,采用非对称耦合系统/结构是近几年新发展的一种实现 PBS 的新设计思路,特别以其超大带宽、超小尺寸、设计方便等突出优点而备受关注。其原理是:通过优化设计使得非对称耦合系统中两条波导的某一偏振模满足相位匹配条件,从而选取合适耦合区长度使之完全交叉耦合;而对于另一个偏振模,由于双折射效应,几乎总不满足相位匹配条件,因而可以很好地抑制其交叉耦合。由此可以很好地实现两个偏振模的有效分离。

基于这一思路,已有多种用于实现 PBS 的非对称耦合结构的报道,包括弯曲非对称耦合结构^[28,29]、条形波导—狭缝波导耦合系统^[30]、纯介质三波导非对称耦合系统等、基于混合等离子体波导的三波导耦合系统^[31]及双波导耦合系统^[32],如图 9 所示。其中,由于硅基混合表明等离子体波导具有超高的双折射效应且与普通硅纳米线波导具有很大的差异性,因而有利于实现超小型 PBS。例如,利用如图 9(c)所示的三波导耦合系统可实现尺寸仅为 $2\text{ }\mu\text{m}\times 5.1\text{ }\mu\text{m}$ 的超小型 PBS^[31];而利用基于混合等离子体波导的双波导耦合系统可实现尺寸更小的 PBS 器件,其尺寸仅约为 $1.9\text{ }\mu\text{m}\times 3.7\text{ }\mu\text{m}$ ^[32]。

2.2.3 偏振旋转器

偏振旋转器(PR)同样是偏振调制系统的关键器件,用于实现平面波导中 TE、TM 模的相互转化。其实现原理通常是基于在非对称结构中混杂模式的干涉或者渐变演化的机制,具体结构一般可采用具有弯曲、倾斜侧壁或者缺角等特殊结构的光波导。参考文献[33]提出一种全新的超小型偏振旋转器设计。其结构非常简单,仅需去除方型光波导的一个边角,使其支持两个传播常数为 β_0, β_1 的混杂模式。当入射线偏振光入射后,将激发这两个混杂模式在缺角光波导中传输并发生干涉。经过一段传输距离 $L\pi=\pi/(\beta_0-\beta_1)$ 后,

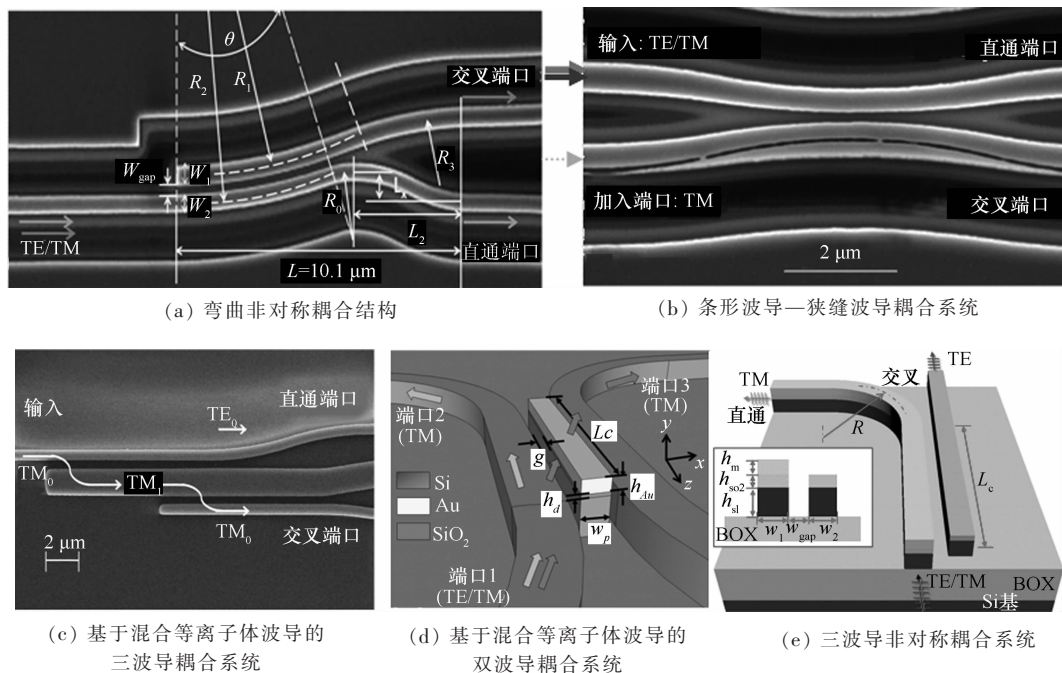


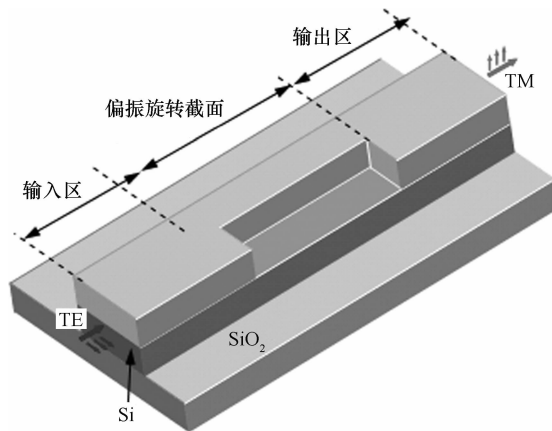
图9 基于非对称耦合系统的新型PBS

即可实现偏振式转换。参考文献[33]给出的设计实例中,给出了一个长度仅为 $7\ \mu\text{m}$ 的超小型偏振旋转器。之后的实验结果表明,基于这一设计的偏振旋转器具有优异性能:在约 $80\ \text{nm}$ 的波长范围内,其转换效率可达到 $-0.51\ \text{dB}$ [34]。

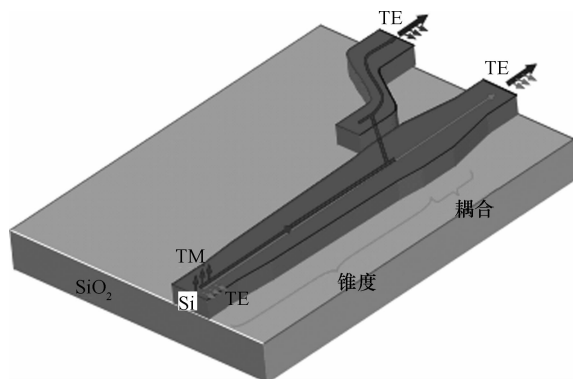
参考文献[35]提出了一种基于缓变光波导中偏振相关模式演变原理实现偏振旋转的全新方案,如图10所示。此结构基于截面不对称的硅纳米线波导(如选取空气薄层或SiN薄层的SOI纳米线波导),由两部分组成:锥型缓变光波导及非对称耦合结构。在锥型缓变光波导区域,利用特定宽度区域存在杂化模式实现 $\text{TM}_0 \rightarrow \text{TE}_1$ 高阶模的转换,继而通过非对称耦合结构将 TE_1 模式耦合至相邻窄波导的 TE_0 模

式,从交叉端口输出。而当 TE_0 模式从输入端口输入时,经过锥型缓变光波导区域时,不发生模式转化,因而仍以 TE_0 模式进入非对称耦合结构,由于两条波导的基模存在显著相位失配,故几乎不发生耦合,最终从直通端输出。

由此可见,参考文献[35]所提出的新结构可同时实现偏振模式分离和转换,是一种偏振分束—转换器件(PSR),适用于很多偏振调控系统。仿真结果表明,该PSR器件带宽达 $70\ \text{nm}$ (消光比 $>10\ \text{dB}$),波导宽度容差达 $-10\sim 20\ \text{nm}$,并且通过选择更长的锥型缓变波导,还可进一步提升其带宽和工艺容差。特别是,该结构仅需一步刻蚀即可,设计简便、工艺简单,因而获得了广泛的关注。此外,除截面不对



(a) 基于缺角光波导的偏振旋转器 [33]



(b) 基于模式演化的偏振分离—旋转器 [34]

图10 偏振旋转全新方案

称的硅纳米线波导外,硅脊型纳米光波导也存在类似的模式演变(已被实验证明^[36]),可用于偏振模转化器件。另一方面,在设计锥型缓变波导时,应注意这种可能存在的偏振模转换,防止由于这种偏振模转换导致的不良影响^[36]。

2.3 模式复用器件

模式复用技术采用波导或光纤中不同的模式作为传输信息的通道,其关键器件之一是模式复用器,用于实现基模—高阶模间转换,并将所激发模式加载至干路波导实现多模式复用。模式复用器是近几年集成光子器件领域的研究热点,目前报道的实现方案主要有 MMI 结构^[37]、绝热模式演变耦合结构^[38,39]以及非对称耦合结构^[40,41]等。其中,MMI 型模式复用器结构较为复杂、不易于拓展模式通道数;绝热模式演变耦合型模式复用器设计较为灵活,主要有缓变非对称 Y 分支、缓变方向耦合器等结构,其缺点是器件整体很长。相比之下,非对称耦合结构尺寸较小、设计更为简单方便,且易于通过级联方式实现多通道模式复用器件。在性能方面,基于非对称耦合结构的模式复用器具有低串扰、低插损、大带宽等特点,获得了广泛关注。

参考文献[40]首次给出了一种基于非对称耦合结构的 4 通道硅纳米线模式复用器设计,如图 11 所示。该模式复用器由 3 个级联的非对称耦合器组成,各自激发相应的高阶模,不同宽度的波导之间通过缓变锥型波导相连。参考文

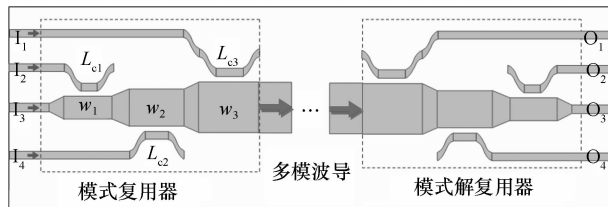


图 11 基于非对称耦合结构的模式复用器

献[41]研制了一个包含 4×1 模式复用器、干路多模波导以及 1×4 模式解复用器的芯片。图 12 是当输入光分别端口 I_1, I_2, I_3, I_4 入射时,各输出端口 ($O_1 \sim O_4$) 的频谱响应。光从单模波导端口 $I_i (i=1, 2, 3, 4)$ 输入时,分别耦合至干路波导的某一个模式并传输一段距离之后,再从相应的输出端口输出。测试结果表明,各模式通道中心波长处的片上损耗(on-chip loss) < 0.5 dB、串扰 < -20 dB,并具有大带宽特性,使之具有良好的波分复用兼容性,有利于实现模式—波长混合复用技术。

3 混合复用器

3.1 偏振—模式混合复用器

为同时实现模式复用和偏振复用技术,参考文献[42]提出一种级联 ADC 型的偏振—模式混合复用器(如图 13(a)所示)。该设计包括一个 PBS(用于 TE 基模和 TM 基模)、3 个用于高阶 TE 偏振模的 ADC 和 3 个用于高阶 TM 偏振模的 ADC,由此获得 4 个 TE 偏振模(TE_0, TE_1, TE_2, TE_3)和

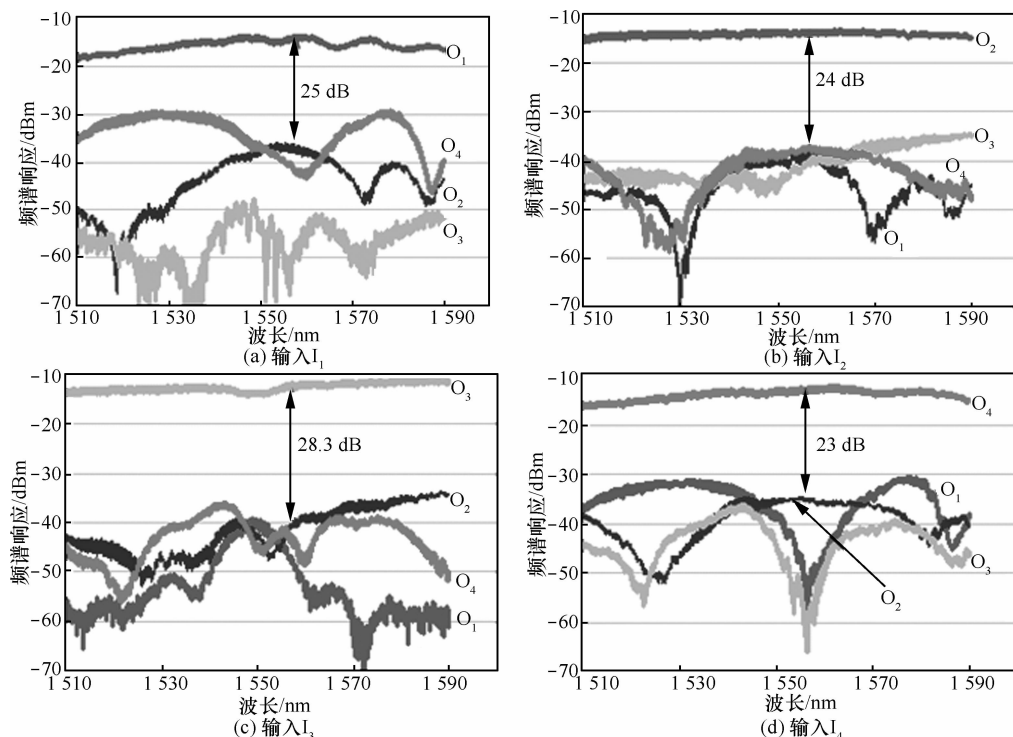


图 12 输出端口($O_1 \sim O_4$)的频谱响应

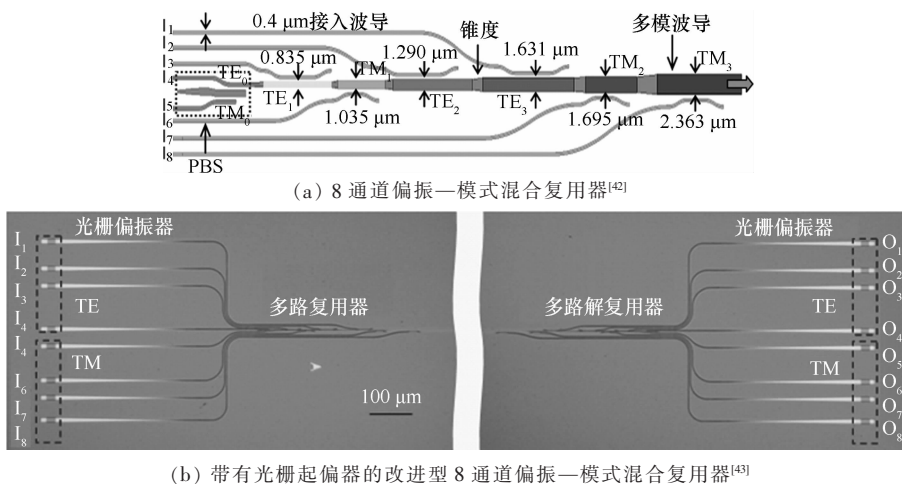


图 13 偏振—模式混合复用器

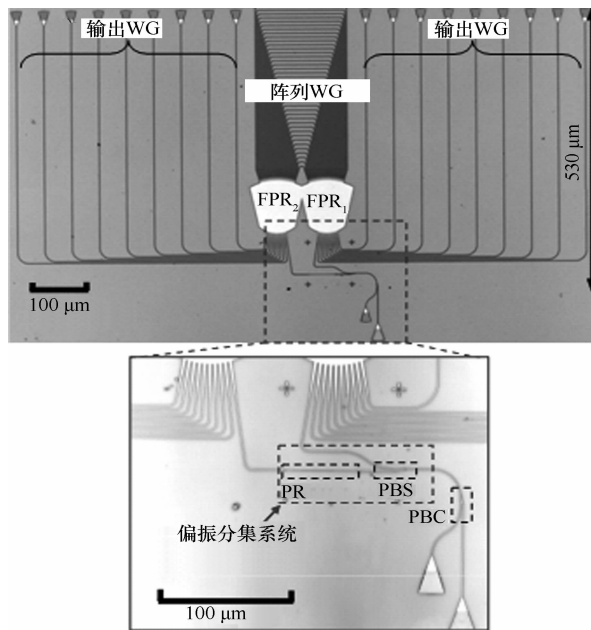
4 个 TM 偏振模(TM_0, TM_1, TM_2, TM_3)的复用或解复用。而为了进一步提高其性能,可以在解复用器的输出端引入起偏器,从而消除其偏振模串扰。例如,参考文献[43]中通过引入波导光栅起偏器,如图 13(b)所示。在此设计中,该波导光栅不仅作为一个具有高消光比的起偏器,同时也可用作光纤—芯片耦合器。与参考文献[42]中结果相比,改进型 8 通道偏振—模式复用器的性能得到显著提高,各通道插入损耗 <2 dB、串扰 <-18 dB。

3.2 偏振—波长混合复用器

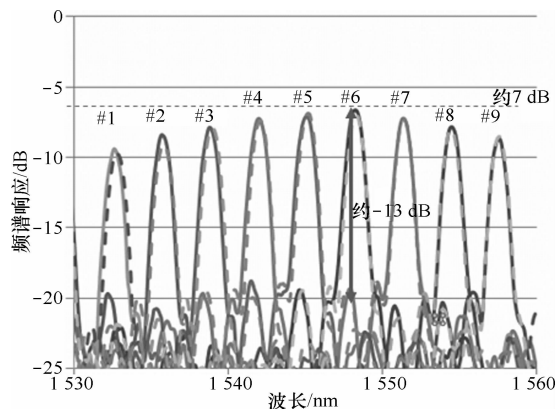
参考文献[44]给出了一种由双向型 AWG 波分复用器件和偏振分集系统组成的新型偏振—波长混合复用器,由此可以实现双倍的通道数,如图 14(a)所示。偏振分集系统由一个基于弯曲耦合结构的 PBS 和一个基于缺角波导的 PR 组成,双向型 AWG 两侧均有 $N+1$ 条波导(其中位于边缘的波导作为输入波导)。当 N 个波长($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$)、两个偏振态组成的 $2N$ 通道光信号从输入端入射后,经过由 PBS 和 PR 组成的偏振分集系统得到两组偏振态均为 TE 偏振的信号($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$)。这两组光信号分别进入双向型 AWG 两个输入端口,各波长通道进而由 AWG 分开,从相应的输出端口输出,即实现双偏振的波分解复用。图 14(b)为各通道的频谱响应,其中实线、虚线分别为 TE 偏振、TM 偏振输出通道的测试结果。由于这两组信号共用同一个 AWG,通道中心波长自动对准,避免了使用两个 AWG 存在中心波长难以对准的问题。

3.3 波长—模式混合复用器

将多模式、多波长结合起来可以实现一种波分—模式混合复用技术,其关键器件是波长—模式混合复用—解复



(a) 所研制偏振—波长混合复用器(18 通道)



(b) 各通道频谱响应的测试结果

图 14 所研制偏振—波长混合复用器及测试结果

用器。参考文献[45]给出了由一个基于级联 ADC 结构的 4 通道模式解复用器和 4 个 16 通道 AWG 组成的波长—模式混合解复用器,如图 15 所示。其中,4 个 AWG 具有相同的设计,其波长通道间隔均为 3.2 nm。当 4 个模式(TM_0 、 TM_1 、 TM_2 和 TM_3)、16 个波长携带的 64 通道光信号入射后,首先被 4 通道模式解复用器分成 4 组(每组均含有 16 个波长通道),从模式解复用器的 4 条单模输出波导出射,各自进入一个 AWG 波分解复用器并被分开,从其输出端口输出。图 16 是光信号分别从输入端口 I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_4 入射时所

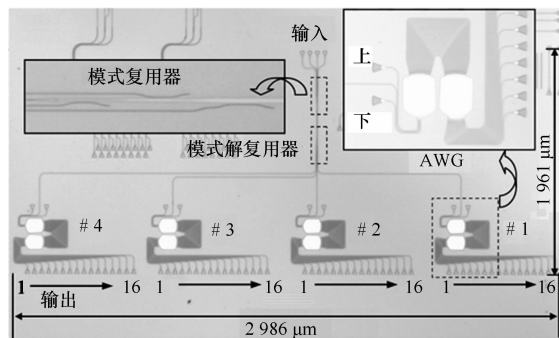


图 15 64 通道波分—模式复用器示意

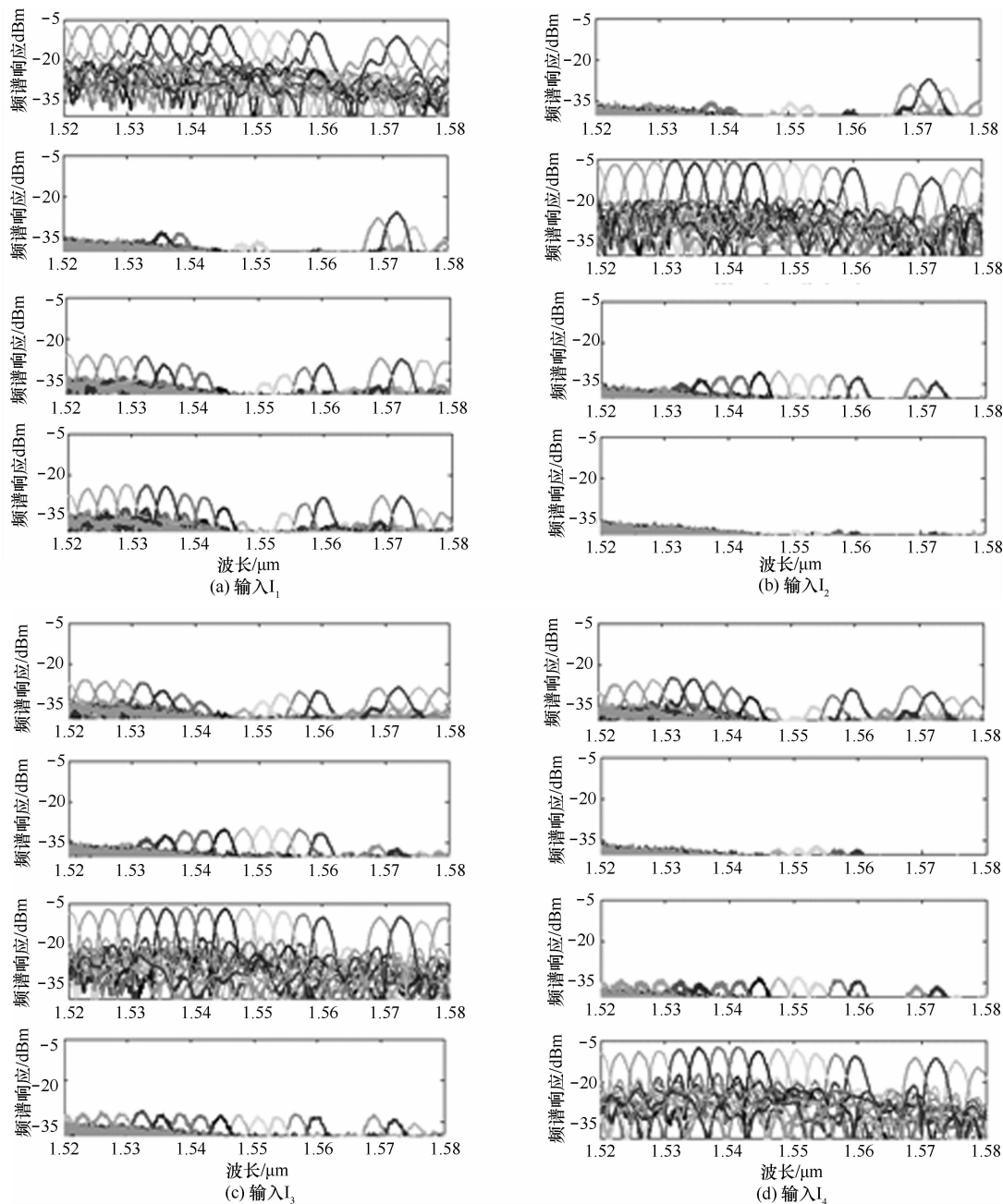


图 16 测试结果



有 64 个输出端口处的频谱响应,由上到下依次为 AWG#1、AWG#2、AWG#3、AWG#4。由图 16 可见,光信号从端口 $I_i (i=1\sim 4)$ 入射时主要从第 i 个 AWG 的端口输出,而 AWG $\#j (j \neq i)$ 端口的出射光功率为 $-25\sim -16$ dB,主要是由 1×4 模式解复用器中模式通道串扰引入。由于基于级联 ADC 结构的 4 通道模式解复用器具有大带宽特性,该波长—模式混合解复用器的输出频谱响应与单个 AWG 相似。

参考文献[46]提出一种基于 $N\times N$ 双向型 AWG 的新型设计。在这种设计中,一个 $N\times N$ 双向型 AWG 等效于 2 个完全一样的 $1\times N$ AWG,显著减少了所需 AWG 数量及其所占面积,同时也降低了多个 AWG 器件波长对准的复杂度。例如,图 17 是一个基于波长—模式混合复用的芯片,包含从 4×1 模式复用器、多模波导到波长—模式混合解复用器的整个链路。其中,波长—模式混合解复用器由一个 1×4 模式解复用器、2 个 17×17 双向型 AWG (16 个波长通道) 构成,模式复用/解复用器仍采用级联非对称耦合结构。实验测试结果表明,波分—模式复用器的模式解复用器部分引入的模式通道间串扰 < -20 dB,而 AWG 波分复用器部分引入的波长通道间串扰约为 -14 dB (与同一芯片上的单个 AWG 性能相似)。可见,通过多模式、多波长的形式,可以显著提升可用通道数,为获得超大容量光通信/光互连链路提供有效途径。

4 结束语

波分复用、偏振复用、模式复用等复用技术是实现光通信/光互连链路容量低成本扩增的有效技术,受到广泛

关注,特别是新近发展的模式复用技术,而将多种复用技术有机融合起来实现多维混合复用技术是未来发展趋势。高性能复用—解复用器件是实现这些复用技术的关键。本文着重总结回顾了基于硅纳米线光波导的超小型复用—解复用器件方面的最新进展,包括波分复用器件、偏振调控器件、模式复用器件以及模式—偏振、偏振—波长、波长—模式混合复用器件等。从目前结果来看,单元器件研究已经取得较好成效,大多具有超小尺寸、性能优良的特点,但仍需进一步提升,从而达到实用化性能要求。在单元器件不断完善的基础上,由于硅纳米线光波导器件具有超小尺寸特征,也有望获得多功能器件的大规模集成,这也正是光子集成发展的大势所趋。

参考文献

- 1 Miller D A B. Device requirements for optical interconnects to silicon chips. *Proceedings of IEEE*, 2009, 97(7): 1166~1185
- 2 Vlasov Y A. Silicon CMOS-integrated nano-photonics for computer and data communications beyond 100 Gbit/s. *Communications Magazine, IEEE*, 2012, 50(2): S67~S72
- 3 Ahn J, Fiorentino M, Beausoleil R G, *et al.* Devices and architectures for photonic chip-scale integration. *Appl Phys A*, 2009(95):989~997
- 4 Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibers. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354~362
- 5 Dai D X, Bowers J E. Silicon-based on-chip multiplexing technologies and devices for Peta-bit optical interconnects. *Nanophotonics*, 2014, 3(4-5): 283~311

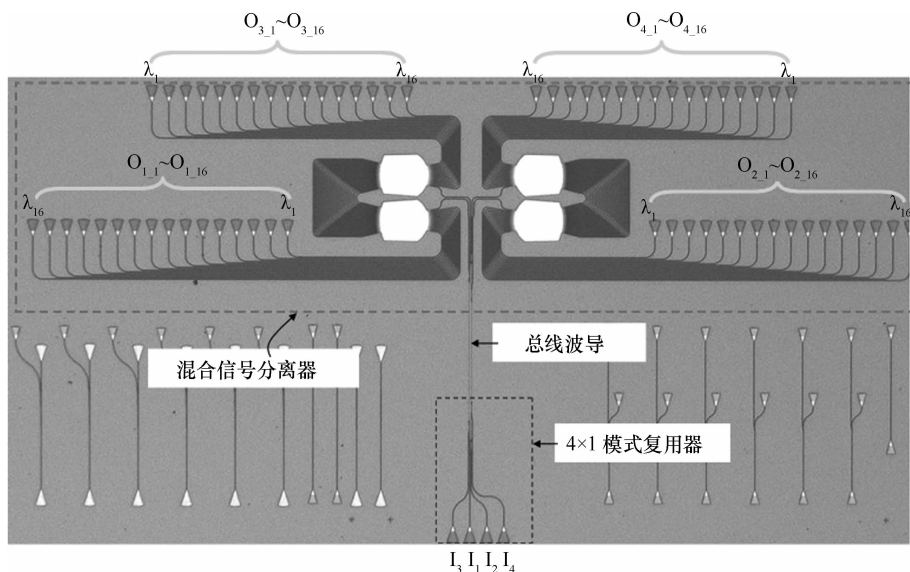


图 17 波长—模式混合复用链路

- 6 Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibers. *Nat Photon*, 2013(7): 354~362
- 7 Alduino A, Liao L, Jones M R, *et al.* Demonstration of a high speed 4-channel integrated silicon photonics WDM link with hybrid silicon lasers. *Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics and Photonics in Switching, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America)*, 2010(3)
- 8 Dong P, Chen Y K, Duan G H, *et al.* Silicon photonic devices and integrated circuits. *Nanophotonics*, 2014, 3(4-5): 215~228
- 9 Dong P, Chen Y K, Gu T Y, *et al.* Reconfigurable 100 Gbit/s silicon photonic network-on-chip[invited]. *J Opt Commun Netw*, 2015(7):A37~A43
- 10 Doylend J, Knights A P. The evolution of silicon photonics as an enabling technology for optical interconnection. *Laser & Photonics Review*, 2012 (1-22)
- 11 Dai D X, Fu X, Shi Y C, *et al.* Experimental demonstration of an ultra-compact Si-nanowire-based reflective arrayed-waveguide grating (de)multiplexer with photonic crystal reflectors. *Optics Letters*, 2010, 35(15): 2594~2596
- 12 Chen P X, Chen S T, Guan X W, *et al.* High-order microring resonators with bent couplers for a box-like filter response. *Optics Letters*, 2014 [to appear]
- 13 Dai D. Silicon mode-(de) multiplexer for a hybrid multiplexing system to achieve ultrahigh capacity photonic networks-on-chip with a single-wavelength-carrier light. *Proceedings of ACP 2012*, Guangzhou, China, 2012
- 14 Dai D X, Wang J, Shi Y C. Silicon mode (de) multiplexer enabling high capacity photonic networks-on-chip with a single-wavelength-carrier light. *Optics Letters*, 2013(38): 1422~1424
- 15 Wang J, He S L, Dai D X. On-chip silicon 8-channel hybrid (de)multiplexer enabling simultaneous mode-and polarization-division-multiplexing. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(2): 18~22
- 16 Wang J, Chen P X, Chen S T, *et al.* Improved 8-channel silicon mode demultiplexer with grating polarizers. *Opt Express*, 2014(22):12799~12807
- 17 Wang J, Chen S, Chen P, *et al.* 64-channel hybrid (de) multiplexer enabling wavelength- and mode-division multiplexing for on-chip optical interconnects. *Proceedings of ACP 2014*, Shanghai, China, 2014
- 18 Chen S T, Fu X, Wang J, *et al.* Compact dense wavelength division (de)multiplexer utilizing a bidirectional arrayed-waveguide grating integrated with a Mach-Zehnder interferometer. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(11): 2279~2285
- 19 Dai D, Fu X, Shi Y, *et al.* Experimental demonstration of an ultra-compact Si-nanowire-based reflective arrayed-waveguide grating (de)multiplexer with photonic crystal reflectors. *Opt Lett*, 2010,35(15): 2594~2596
- 20 Okamoto K, Ishida K. Fabrication of silicon reflection-type arrayed-waveguide gratings with distributed Bragg reflectors. *Opt Lett*, 2013(38): 3530~3533
- 21 Liang D, Srinivasan S, Fattal D A, *et al.* Teardrop reflector-assisted unidirectional hybrid silicon microring lasers. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(22): 1988~1990
- 22 Schmidt X Q, Shakya B J, Lipson M. Cascaded silicon micro-ring modulators for WDM optical interconnection. *Opt Express*, 2006(14):9431~9435
- 23 Chen P, Chen S, Guan X, *et al.* High-order microring resonators with bent couplers for a box-like filter response. *Opt Lett*, 2014(39): 6304~6307
- 24 Dai D, Liu L, Gao S, *et al.* Polarization management for silicon photonic integrated circuits. *Laser & Photonics Reviews*, 2013,7(3): 303~328
- 25 Guan X, Chen P, Chen S, *et al.* Low-loss ultracompact transverse-magnetic-pass polarizer with a silicon subwavelength grating waveguide. *Opt Lett*, 2014(39):4514~4517
- 26 Guan X W, Xu P P, Shi Y C, *et al.* Ultra-compact broadband TM-pass polarizer using a silicon hybrid plasmonic waveguide grating. *Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference*, Beijing, China, 2013
- 27 Guan X, Xu P, Shi Y, *et al.* Ultra-compact and ultra-broadband TE-pass polarizer with a silicon hybrid plasmonic waveguide. *Proceedings of SPIE Photonics West*, San Francisco, USA, 2014
- 28 Dai D, Bowers J E. Novel ultra-short and ultra-broadband polarization beam splitter based on a bent directional coupler. *Opt Express*, 2011(19):18614~18620
- 29 Wang J, Liang D, Tang Y, *et al.* Realization of an ultra-short silicon polarization beam splitter with an asymmetrical bent directional coupler. *Opt Lett*, 2013, 38(1):4~6
- 30 Dai D, Wang Z, Bowers J E. Ultrashort broadband polarization beam splitter based on an asymmetrical directional coupler. *Opt Lett*, 2011,36(13): 2590~2592
- 31 Lou F, Dai D, Wosinski L. Ultracompact polarization beam splitter based on a dielectric-hybrid plasmonic-dielectric coupler. *Opt Lett*, 2012,37(16):3372~3374
- 32 Guan X, Wu H, Shi Y, *et al.* Ultra-compact and broadband polarization beam splitter utilizing the evanescent coupling between a hybrid plasmonic waveguide and a silicon nanowire. *Opt Lett*, 2013, 38(16): 3005~3008
- 33 Wang Z, Dai D. Ultrasmall Si-nanowire-based polarization rotator. *J Opt Soc*, 2008(B25): 747~753
- 34 Vermeulen D, Selvaraja S, Verheyen P, *et al.* Silicon-on-insulator polarization rotator based on a symmetry breaking silicon overlay. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(6): 482~484



- 35 Dai D, Bowers J E. Novel concept for ultracompact polarization splitter-rotator based on silicon nanowires. *Opt Express*, 2011(19): 10940~10949
- 36 Dai D, Tang Y, Bowers J E. Mode conversion in tapered submicron silicon ridge optical waveguides. *Opt Express*, 2012, 20(12): 13425~13439
- 37 Uematsu T, Ishizaka Y, Kawaguchi Y, *et al.* Design of a compact two-mode multi/demultiplexer consisting of multi-mode interference waveguides and a wavelength insensitive phase shifter for mode-division multiplexing transmission. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(15):2421~2426
- 38 Love J D, Vance R W C, Joblin A. Asymmetric, adiabatic multipronged planar splitters. *Optical and Quantum Electronics*, 1996,28(353)
- 39 Greenberg M, Orenstein M. Multimode add-drop multiplexing by adiabatic linearly tapered coupling. *Opt Express*, 2005(13)
- 40 Dai D. Silicon mode-(de)multiplexer for a hybrid multiplexing system to achieve ultrahigh capacity photonic networks-on-chip with a single-wavelength-carrier light. *Asia Communications and Photonics Conference, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America)*, 2012(2)
- 41 Dai D, Wang J, Shi Y. Silicon mode(de)multiplexer enabling high capacity photonic networks-on-chip with a single-wavelength-carrier light. *Opt Lett*, 2013(38):1422~1424
- 42 Wang J, He S, Dai D. On-chip silicon 8-channel hybrid (de) multiplexer enabling simultaneous mode-and polarization-division-multiplexing. *Laser & Photonics Rev*, 2014, 8(2): L18~L22
- 43 Wang J, Chen P, Chen S, *et al.* Improved 8-channel silicon mode demultiplexer with grating polarizers. *Opt Express*, 2014 (22): 12799~12807
- 44 Chen S T, Shi Y C, He S L, *et al.* Compact monolithically-integrated hybrid (de)multiplexer based on

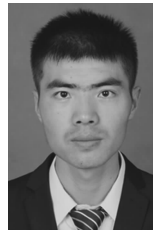
silicon-on-insulator nanowires for PDM-WDM systems. *Optics Express*, 2015,23(10): 12840~12849

- 45 Wang J, Chen S, Dai D. Silicon hybrid demultiplexer with 64 channels for wavelength/mode-division multiplexed on-chip optical interconnects. *Opt Lett*, 2014(39): 6993~6996
- 46 Dai D X, Wang J, Chen S T, *et al.* Monolithically integrated 64-channel silicon hybrid demultiplexer enabling simultaneous wavelength and mode-division-multiplexing. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(3): 339~344

[作者简介]



戴道钊,男,浙江大学光电科学与技术学院教授、博士生导师,主要从事硅基光子器件与集成及其应用的研究工作。



王健,男,博士,主要从事光集成器件及其应用的研究工作。



陈思涛,男,浙江大学光电科学与技术学院博士生,主要从事光集成器件及其应用的研究工作。