

硅光子通信产品技术和商业化进程

Technology and Commercialization Progress of Silicon Photonics Communication Products

孙笑晨/SUN Xiaochen
张琦/ZHANG Qi

(中兴光电子技术有限公司, 江苏 南京
210000)
(ZTE Photonics Technology Co., Ltd.,
Nanjing 210000, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0002-005

摘要: 通过对硅光子商业化进程特别是一系列成功和失败案例的介绍, 解释了硅光子所依赖的生态系统的重要性及其对具体技术路线和商业模式选择的影响, 并结合最新的硅光子产品开发和量产情况, 指出了硅光子在各种产品方案中的优势和挑战。

关键词: 硅光子; 集成光子; 光子集成电路 (PIC)

Abstract: In this paper, through a brief review of silicon photonics history with an emphasis on the successes and failures of its commercialization progress, the importance of the ecosystem silicon photonics relies on and its impact on the choices of technical paths and business models are analyzed. With the latest status of silicon photonic product development in the industry, the advantages and the challenges of current and emerging product solutions are identified.

Key words: silicon photonics; integrated photonics; photonic integrated circuit (PIC)

1 硅光子技术和商业化回顾

在20世纪中期, 半导体产业刚兴起时便有人提出过在硅材料上制作波导等光学结构的想法, 但这一领域的真正启动始于20世纪80年代末至90年代初 SOREF Richard^[1,2]和 REED Graham^[3]等人的一系列早期工作。硅光子领域的基础是硅半导体生态系统, 而这个基础则决定了硅光子发展的各个里程碑处处呈现出集成了成电路 (IC) 的技术发展和影响的影子。

硅光子基于 IC 技术的特点使它很早便进入了一些 IC 大公司的视野。在 21 世纪初, IBM、Intel、Sun Microsystems (后并入 Oracle)、NTT/NEC 等公司便设立独立硅光子部门并投入大量资源, 和学术界齐头并进地进行硅光子科研, 这种情况以往并不常见。和资源有限的学术界不同, 这些公司本来就处于 IC 生态系统的领导地位, 能利用更多工艺和配套的资源, 以独立或与学术界合作的形式为很多重要的结果做出了巨大的贡

献, 包括高速调制器、锗探测器^[4]、低损光波导^[5]和混合集成的结果。另一个突出的现象是绝大多数目前被广泛认为取得成功的硅光子初创公司均创立在这 10 年间, 包括前 5 年的代表 Luxtera、Kotura、Lightwire 和后 5 年的代表 Aurion、Acacia (硅光子为其主要技术点之一)。

半导体工艺对硅光子而言, 具有举足轻重的作用; 但由于硅半导体产业的规模十分庞大, 绝大多数 Foundry 注重规模效应, 很难在一个新技术并未有明确产品化验证和市场规模之时给予资源支持, 所以除了少数如 IBM/Intel 利用公司内部资源和 Luxtera 在大量投资支持下说服 Freescale (后被 NXP 收购) 进行工艺开发, 最初的工艺只能在资源有限、设备落后的学校和研究机构的实验室进行。所幸以欧洲著名 IC 工艺研发机构 imec 为代表的一些具有比较前沿半导体工艺能力的机构, 开始投入

资源进行专门开发为硅光子优化的工艺, 并做出了很多优秀的结果。因此, 这段时间的很多科研成果一方面归功于设计上的创新和优化, 另一方面离不开逐渐进步的工艺。2005 年以后, 除 Kotura 等少数有特殊工艺需求的方案外, 大多数工艺开发机构逐渐把硅波导的工艺控制在厚度为 220 ~ 400 nm (尤其是 220 nm) 的绝缘衬底上的硅 (SOI) 平台上, 这种标准化对之后硅光子的商业化发展具有极其重要的意义。

硅光子的真正产品化是在 2010 年之后, 突出表现为一系列通信系统公司对硅光子初创公司的高价收购。在这期间, 有更多的初创公司出现, 这些新创立的公司大多把目光瞄准了异军突起的数据中心市场, 但目前仅 Luxtera 有稍具规模的产品销售。当前的产业化阶段和行业特点对初创公司的发展有着十分严峻的挑战。

收稿日期: 2017-08-06
网络出版日期: 2017-09-14

在工艺研发方面,除 imec 外,更多的机构如新加坡的 IME、法国的 CEA Leti、日本的 PETRA 和美国以 SUNY 为前身新设立的国立 AIM Photonics,都陆续形成了稳定的研发(甚至小量生产)工艺线,为科研院所和初创公司提供了工艺上的巨大支持。中国的硅光子工艺起步虽晚,但发展很快。近几年在中芯国际、中科院微电子所和半导体所等都有不同程度的工艺开发,不过工艺成熟度离以上几家仍有差距。

目前硅光子较为成功的产品主要应用在数据中心和相干传输两个领域。从实用主义角度出发,我们认为各种利用了各级别硅半导体工艺和生态系统的、有价值的光芯片产品都可称为硅光子产品。另外,我们还认为其他材料体系(如 GaAs 等)仍有其存在的必要性,InP 为基础的光芯片并不会消失或被替代,尤其是在目前硅光子仍极度依赖高性能的 InP 激光器的情况下。在未来相当长一段时间里,硅光子和 InP 的产品都将不断继续进步并互为补充。

2 硅光子技术在数据中心中的应用

使用硅做光芯片,正如半个世纪前使用硅做 IC 芯片一样,都不是从性能上最好的材料平台选择。直到今日,基于 GaAs 和 InP 的 IC 产品仍然在很多应用上有着不可替代的作用。在 IC 的半个多世纪的发展历史中,硅的原料丰富性、可规模制作性、稳定的化学性质、理想的力学和热学性质、高质量的氧化物、灵活的可掺杂性等各种性质,决定了它能够战胜各种对手材料而形成今天绝对的主导地位。在这个过程中,针对硅材料和工艺的大量研究投入,以及全世界硅半导体产业不断进步和细分,产生了一个庞大的生态系统。其工艺和产品质量的高度稳定性和可重复性,以及有保障的快速量产增速的优势使得凡是能搭上这个生态系统的产

业都具备了极大的优势,典型的成功例子为微机电系统(MEMS)、图像传感器,目前两者皆已成为百亿美元量级的领域,虽然仍不足整个半导体产业的 3%。

同样,对于硅光子,大多数清醒的从业者尤其是产业界,看中的并不是它的性能,而是上面提到的这些优势;但利用庞大半导体生态系统并不是没有缺点,由于这个产业的专业细分化和各层次的高度成熟性,使得在未形成有效的 Fabless-Foundry 模式前,进入的门槛和初始的投入非常大。无论对于初创公司还是大公司的部门,都需要准备大量的研发资源并仔细考虑其应用场景。应用场景的定位,在 21 世纪初十分模糊的,当时的一些看法和今天真正的产品有很多差异。按照上面提到的特点,可以预见有意义的产品方向为:数量大、成本敏感但对性能要求不高的,以及成本不敏感但对集成小型化有强烈要求的。

数据中心(特指互联网的超大型数据中心,而不是企业级)的出现具有一定的偶然性。在硅光子发展的早期,并没有这个领域。由于上述原因,不少人把目光转向了在光通信中数量最大的无源光纤网络(PON)领域,但 PON 领域的应用由于功能结构简单而形成了基于 TO 封装的高度自动化低成本方案,随着 Exponent 和 Onechip 等利用 InP 或其他材料的各种集成方案的相继失败,使得硅光子从业者把目光转移到其他方向。

在早期成立的几个初创公司中,Kotura 偶然找到了一个很小众的特殊可调光衰减器(VOA)应用,Luxtera 通过 Molex 曾短暂打入了 40 G 有源光缆(AOC)的一些独特客户群,而 Lightwire 被 Cisco 收购后则专注于内部定制的小众 CPAK 产品。直到以 Google、Amazon、Microsoft 等互联网公司以及其他 Co-location 客户陆续跟进的超大型数据中心的建设和升级运动开始,Luxtera 等硅光子公司终于找

到了一个真实的方向。

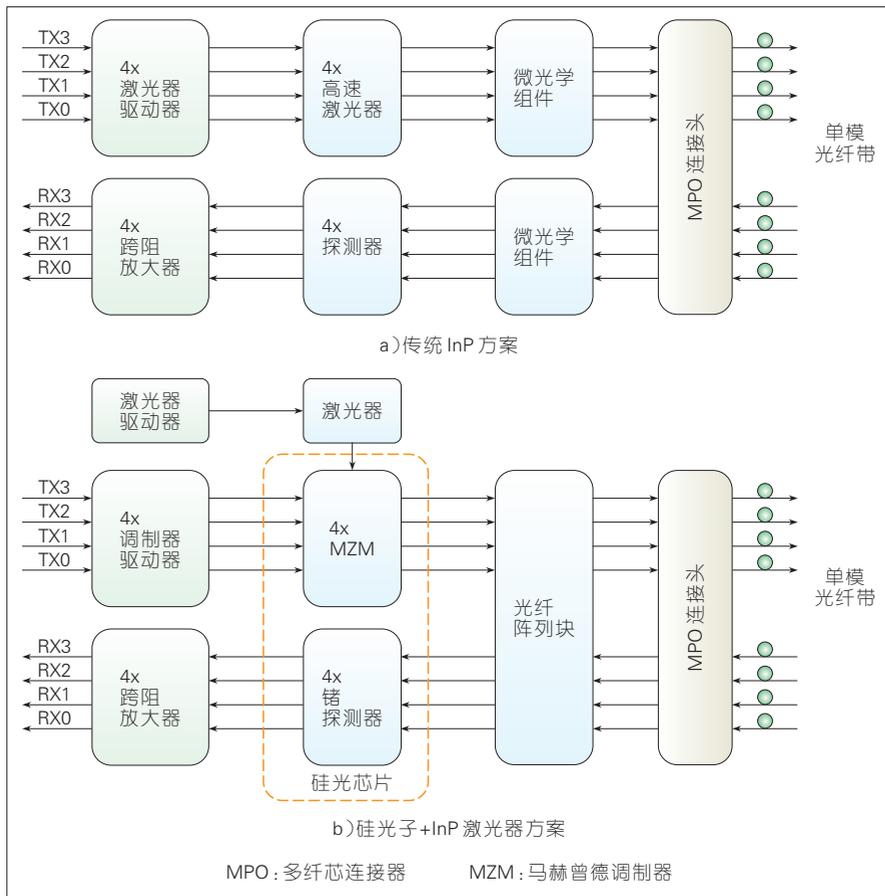
值得注意的是:这一轮数据中心的兴起,硅光子并不是唯一的受益者。事实上,使用传统的 InP 加微光学耦合方案的公司,在数据中心指标降低的情况下,由于其积累多年的技术储备和量产经验,是目前获益最多的。硅光子方案已形成产品的主要竞争者 Luxtera 和 Intel 目前以激进的定价为主要武器,并皆以此为机会积累硅光子产品量产经验以面对未来增产和其他可能出现的市场。

在最近这一轮数据中心光通信模块采购大潮中,100 G 4 通道 28 G 小封装可插拔光模块(QSFP28)是最引人注目的产品,也是硅光子真正形成量产的产品,这类产品主要有两类:用于 500 m 以下的 4 通道并行单模(PSM4)方案和用于 2 km 的粗波分复用(CWDM)方案。这些方案也是未来 200 G/400 G 甚至更高速的应用中的基础,有相应的解决方案提议。

2.1 PSM 的方案

PSM 方案为使用多根单模光纤实现多通道通信,而总带宽达到整体要求的方案。这类方案由于使用的光纤数目多于各种波分复用(WDM)的方案,传输距离不能过长,否则光纤的成本将掩盖方案本身的成本优势。方案的主要优势在于成本,因为每个通道可以使用同样 1 310 nm 波长的激光器且没有 Mux/DeMux 元素,在组件和封装上都具有成本优势。PSM 是目前硅光子最成熟且实现量产的产品方案。

图 1 中描述了 100 G PSM4 典型 InP 方案和硅光子+InP 激光器方案。在传统 InP 方案中,4 组 InP 的激光器为高速激光器(如 25 Gbit/s),并使用其进行信号调制。由于距离短,对激光器的出光功率、消光比和啁啾要求很低,激光器的制造商基本把精力放在调制速率上,目前此类激光器的需求非常大,不少厂家已经在扩产。激光器和光纤的耦合一般使用透镜主



▲图1 100G PSM4示意

动有源对准,对准难度不太复杂。接收端一般使用探测器阵列,配合光纤阵列头和透镜组进行耦合,也有使用单独通道的耦合方式,对准精度要求不高,但也以有源为主。使用此类方案目前产量较大的代表为 Applied Optoelectronics、Innolight 等,不少中小模块厂商都在试图进入这个市场。

从图1中可以看出:硅光解决方案中的硅PIC芯片包含4个马赫曾德调制器(MZM),同时使用一个激光器作为光源给4个调制器供直流光。PIC芯片同时集成锗硅光探测器(PD),并一般把4进4出的8个光纤接口做成光栅耦合阵列和光纤阵列块一次性耦合,减少封装步骤。从组件成本来看,假设硅光方案的2个IC芯片(4通道高速调制器驱动和单通道DC激光器驱动)和InP方案里IC芯片(4通道高速激光器驱动)在未

来基本相当,主要的成本比较为:硅光子集成电路(PIC)芯片、DC大功率激光器芯片(4路共用、调制器损耗和耦合损耗需要大功率的光源来弥补)以及耦合激光器和光纤阵列的相应无源组件;InP 4个高速激光器芯片,4个PD芯片和耦合光纤的相应无源组件。此外,和IC不同,对于光器件,还有占相当比重的封装成本。对于这类综合成本的比较,每个公司因为具体方案的差异,外人很难做出准备判断,但共识的一点为目前没有哪一方有压倒性的优势。这里需要特别强调的是激光器的耦合方案,因为这是重要的成本组成部分,我们会有有更详细介绍。在技术上,硅光子一个重要的论点为到下一代50G(50G-NRZ或100G-PAM4)外置调制器的性能要远优于直调激光器^[6-8]。这个结论被大多数人所认可,不过目前并

无定论是否直调激光的方案一定无法在下一代量产商用。

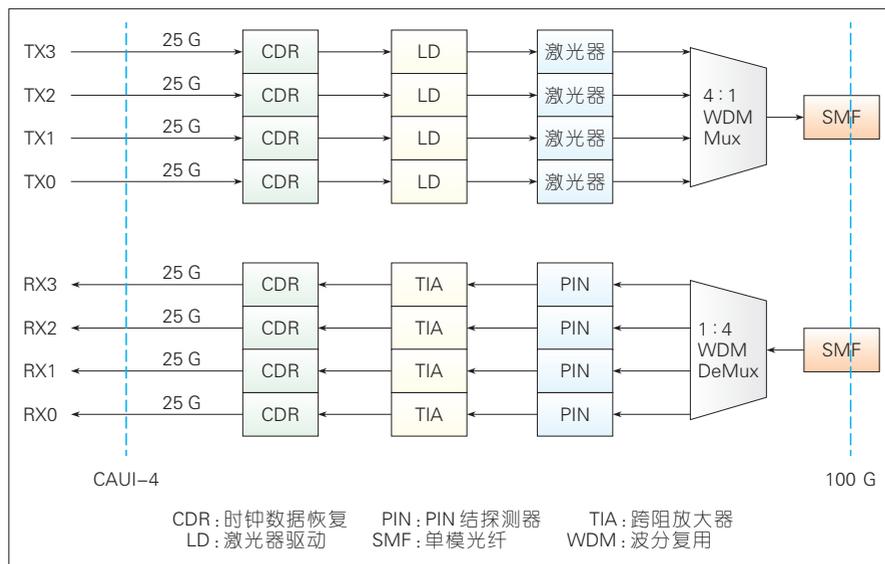
2.2 CWDM的方案

图2描述了100G CWDM4典型的InP方案,和PSM4相比,该方案中使用了4个不同波长并通过Mux/DeMux使用同一根光纤收发所有波长。图中没有画出相应的硅光方案是因为:一方面由于容易想象在类似于PSM的情况下,使用集成的调制器和直流激光器代替高速激光器,并集成PD的情况;另一方面是对于Mux/DeMux的处理存在不同的方案。目前,在该应用的市场基本仍由全InP的方案所占有,一方面该应用的硅光方案并不能如PSM那样使用一个激光器,因此在组件成本方面没有明显优势;另一方面耦合4个激光器进入硅光芯片对封装提出了很大的挑战。而Intel采用的源于UCSB的InP-Si异质混合集成技术在封装方面则有很大优势,因为基于InP的激光器材料是使用die-to-wafer bonding,在后端工艺前集成在硅光wafer上的,解决了后面耦合的问题。该技术也有明显的缺点:一方面破坏了硅光的互补金属氧化物半导体(CMOS)材料兼容性使得Foundry生产的可能性非常低(Intel使用自己的专用fab产线),另一方面该设计从理论上便无法达到独立激光器的效率,降低了整体性能^[9]。

能够集成Mux/DeMux在硅PIC上是硅光方案的一个重要的优点,但目前为止由于工艺和需热调的一些原因在产品化上并不是十分顺利。不过,这个应用是各硅光子产品在未来几年力争进入甚至主导的市场。

2.3 光源的耦合

对于除Intel方案外的硅光子数通产品方案,耦合直流激光器是一个实现困难但又必须的部分。硅光芯片上常见的耦合原理为在芯片边缘波导截面的边耦合和使用光栅耦合



▲图2 100G CWDM4 示意

的表面耦合。前者常用于和光纤的耦合,为光纤块(有时加上透镜)的有源对准。在用于和激光器的耦合时,一般采用无源的 flip-chip 方式,把激光器裸芯片直接倒装在硅光芯片上,通过不同的耦合和辅助结构来尽量减少位置误差。目前 Mellanox 和 MACOM 采用该方案,前者有一定的量产。光栅耦合方式对准容差较大,但该方案需要比较复杂的基于硅光平台的激光微封装,Luxtera 目前采用该方案用于量产。光源的耦合是硅光一个重大的问题,学术界仍针对各种单片集成方案继续研究,工业界则试图通过各种方案降低封装的复杂度、提高自动化和耦合效率。

3 硅光子在电信传输网的应用

光传输网(OTN)是以波分复用技术为基础,在光层组织网络的骨干传送网。大容量、长距离的传输能力是光传送网的基本特征。随着传送网客户信号带宽需求的不断增加,光传送网需不断采用革新的传输技术提升传输能力。目前主要采用带外前向纠错(FEC)、新型调制编码(强度和相位结合调制、偏振复用、相干接收)结合色散光域可调补偿、电

域均衡等技术增加 OTN 网络在高速(40 Gbit/s 以上)大容量配置下的组网距离。光传输网产品因为速率及传输距离要求高,通常光器件价格较高,对成本上没有 PON 及数据中心应用那么敏感。随着带宽需求的不断增加,对光器件集成度、尺寸、功耗提出了越来越高的要求^[10-11]。

3.1 相干接收

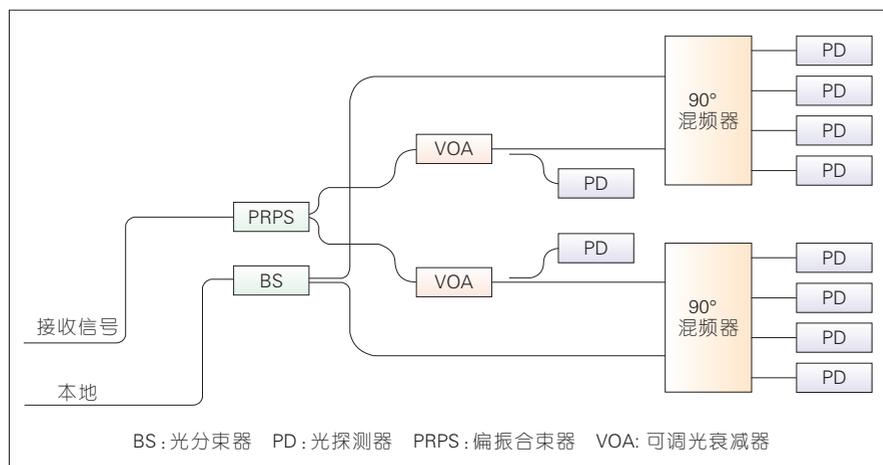
相干光接收机是 100 G / 200 G / 400 G 光模块中的核心部件,其结构如图 3 所示。硅基相干光接收器件主要由功率检测 PD、高速 PD、90°混频器、偏振合束器(PRPS)、光分束器

(BS)、VOA 组成。信号光耦合至芯片后,经过 PRPS,将横电波模式(TE)与横磁波模式(TM)分离,并且 TM 模转换为 TE 模。经过 VOA,分别进入两个 90°混频器,与本振光进行混频。在 VOA 后放置的功率检测 PD 可以进入 90°混频器的光功率,用于调控 VOA 以保持两个偏振态的信号强度相等。信号光与本振光经过混频后,被 PD 接收,转化为电信号,进行平衡接收。其关键技术点包括:

(1)采用硅基异质外延的锗进行光探测器的集成。采用硅基异质外延的锗进行 PD 的集成,可以充分发挥光子集成的优势,大大提高器件的集成度,且避免了封装时将探测器与光芯片耦合的步骤,提高器件的可靠性和可生产性。面对更高密度、更高速率的通信要求,硅基异质外延的锗探测器是最有前景的解决方案。

(2)硅基 90°混频器集成。相干接收需要本振光与信号光以特定的相位差混频产生拍信号,混频中功率分配的一致性和相位差的准确性直接影响接收性能。相对于传统的分离器件的解决方案,将 90°混频器集成在硅芯片上,可以有效地减少器件的尺寸,大大减少耦合对准的复杂性,降低器件间的串扰以及耦合带来的插损。

(3)硅基偏振转换和分离器集成。由于光通信中对信息密度的要



▲图3 硅基相干光接收机结构示意图

求,为了有效利用有限的带宽,往往采用偏振复用的方式,偏振合束器在这里起到关键作用。在传统的相干接收中,往往采用分离器件或者空间光学的方法实现。由于硅材料本身是各向同性的材料,有别于传统的用于偏振转换的各向异性材料,硅基的偏振转换与分离需要精巧的设计来完成。

3.2 相干调制器

高阶调制格式是实现超高速大容量光信号长距传输的主要技术手段之一。在长距离相干光模块中四相相对相移键控(DQPSK)的调制方式已经得到商用,在超 100 G 相干光传输中,16 正交振幅调制(QAM),以及更高阶 QAM 的调制方式也已进入了比较成熟的研究阶段。

图 4 为硅基相干调制器的结构图。相干调制器主要由 BS、MZM、PRPS 以及功率监测 PD 组成。发射一侧的本振光经过 3 级 1×2 的光分束器进入 4 个 MZI 高速光调制器中,在加载由 DSP 输出的电调制信号后,通过调整 4 个 MZM 的相对工作状态并由偏振合束器输出,形成 DQPSK/16AQM 的光调制信号。功率监测 PD

用于及时反馈每个调制器的不同工作状态。

相干调制器的技术难点在于优化各项参数,实现光与微波信号的速度匹配,共面波导电极的阻抗匹配及微波信号的低损耗传输,有效提升光调制的带宽特性和改善高速信号的完整性问题,并降低由调制效率和带宽的 trade-off 所带来的限制,从而在同样的频率范围内,获得更高的调制效率,减小因调制不足导致的插入损耗及驱动电压。

4 其他应用场景

除了上面两个方向外,硅光子在其他光通信领域也有应用。目前成功量产的典型是 Inphi 为 Microsoft 的数据中心互联(DCI)应用定制的 ColorZ 产品。由于是新兴的产品定义(非传统 DCI),Inphi 有很大的自由度设计自己的产品,采用了 2 个波长和 50 G-PAM4 以达到单一模块 100 G 的长距(上至 80 km)传输。这个产品有其独特性,需要客户在传统的电信通信解决方案上做出修改,从系统级开始定制,适合 Microsoft、Google 这类自身有很强系统经验和团队的客户。2017 年 OFC 期间 Inphi 宣布对其他客

户开放这个方案,未来也许会看到这个方案和其他类似的方案在不同客户和场景下取得应用。

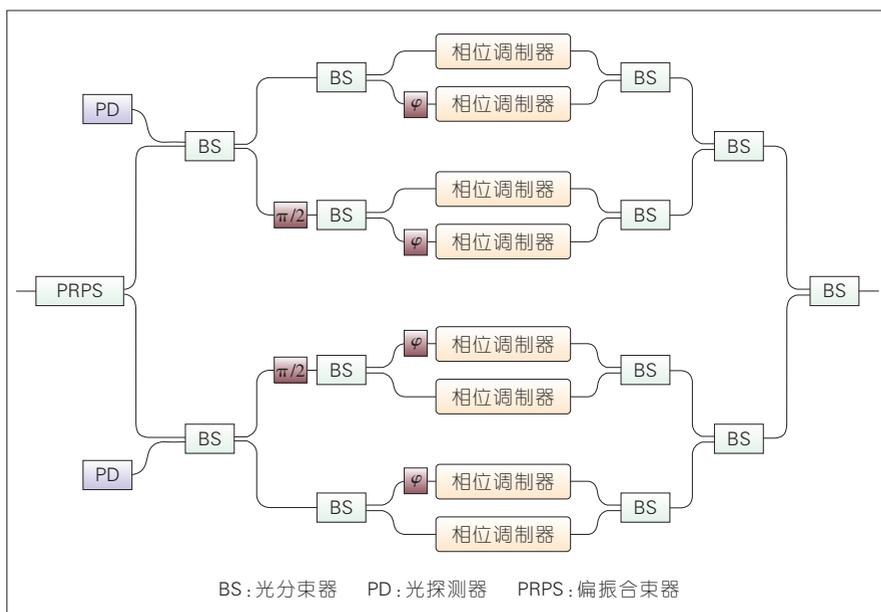
此外,基于硅光外腔的可调谐激光器也是近年来一些公司非常希望实现产品化的方向:一方面希望基于硅光外腔的可调谐激光器能够成为实现低成本 WDM-PON 的关键技术,另一方面如果能可靠实现窄线宽和高输出功率(~ 100 kHz, >13 dBm),则可能替代相干通信中 iTLA 类可调谐激光器,向低成本和进一步小型化的方向发展。在这类设计中,一般利用游标效应在硅光芯片上通过两个自由光谱范围(FSR)略有不同的谐振腔在比较宽的范围内调节激光波长,对于窄线宽可能还需要滤波器之类结构,具体的设计各有不同。一个主要的难点是:增益芯片和硅光外腔芯片的耦合,这个耦合的损耗和界面反射对整体激光器的性能影响很大,且有可靠性的考虑,要求非常高。目前该方案还没有看到量产的产品。

5 结束语

硅光子技术在商业化进程上相比于很多新技术有很大的不同,工业界从很早便开始大力投入这个领域,并在很多时候比学术界走得更快。文章中,我们试图通过回顾硅光子技术和商业化发展的历史,来分析这个现象并希望继续或准备开发或使用硅光子技术的工业界成员有一些提示。我们认为硅半导体生态系统是硅光子最大的凭借,很多技术开发和商业模式的决策应从这个角度出发。这个观点在文中列举的目前取得成功的几个硅光子产品方向上得到一定印证。文章中,我们还对不同的硅光子方案的优缺点进行了分析,并对产品化中重点的努力方向做了一些描述。

参考文献

- [1] SOREF R, LARENZO J. All-Silicon Active and Passive Guided-Wave Components for $\lambda = 1.3$ and $1.6 \mu\text{m}$ [J]. IEEE Journal of



▲图 4 硅基相干调制器结构示意图

➡下转第 14 页