



综述

光子集成技术及产业发展研究

吴冰冰, 赵文玉, 张海懿

(工业和信息化部电信研究院通信标准研究所 北京 100191)

摘要: 针对光子集成这一未来光器件的主流发展方向, 报告了光子集成的技术发展和产业发展现状, 在此基础上对光子集成面临的主要挑战和未来应用前景进行了分析, 并探讨了我国光子集成技术及产业发展的策略建议。

关键词: 光子集成; 光器件; 光通信

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015009

Research on Technology and Industry Developments of Photonic Integrated Circuits

Wu Bingbing, Zhao Wenyu, Zhang Haiyi

(Research Institute of Communication Standards, China Academy of Telecommunication Research,
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, Beijing 100191, China)

Abstract: The photonic integrated circuits (PIC) are main trend of optical components. The developments of PIC on both technology and industry perspectives were studied, then challenges and future application prospects of PIC were discussed. Finally, the strategies of PIC developments in China were proposed.

Key words: photonic integrated circuit, optical component, optical communication

1 引言

光器件是光通信系统的基础与核心, 最能够代表一个国家在光通信技术领域的水平和能力。光子集成 (photonic integrated circuits, PIC) 是指将多个光器件集成在一起的技术, 相对于目前广泛采用的分立元器件, 在尺寸、能耗、成本、可靠性等方面拥有巨大优势, 是未来光器件的主流发展方向^[1,2]。近年来, 随着技术的逐渐积累以及产业需求的旺盛, PIC 进入较快发展时期, 并被誉为光通信产业革命在未来 10 年中的核心部分和最大贡献者。本

文首先对 PIC 的技术、产业发展现状展开研究, 在此基础上分析 PIC 面临的主要挑战和未来应用前景, 并探讨我国 PIC 技术及产业发展的策略建议。

2 技术发展研究

2.1 实现分类

从不同角度, PIC 有多种分类方式, 如图 1 所示。根据集成的元器件是否具有相同功能, PIC 可分为水平集成和垂直集成。水平集成是将多个相同功能的元器件集成在同一衬底上, 形成阵列, 以实现小型化; 垂直集成是将不同

收稿日期: 2014-09-24; 修回日期: 2014-10-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863”计划) 基金资助项目 (No. 2012AA011303, No. 2013AA013402), 国家重点基础研究发展计划 (“973”计划) 基金资助项目 (No. 2010CB328200, No. 2010CB328201), 国家自然科学基金资助项目 (No. 61171076, No. 61201260)

Foundation Items: The National High-Tech Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA011303, No. 2013AA013402), The National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2010CB328200, No. 2010CB328201), The National Natural Science Foundation of China (No. 61171076, No. 61201260)

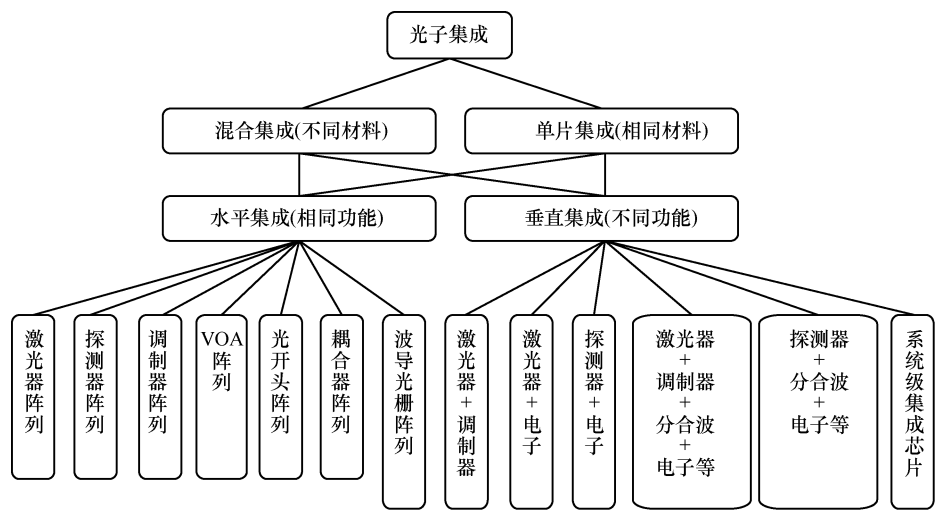


图 1 光子集成的实现分类

功能的元器件集成在同一衬底上,实现小型化、低成本、低损耗和高可靠性。从材料选择上讲,水平集成更容易实现单片集成,随着器件功能的增多,对于单一材料的限制越来越苛刻,垂直集成实现单片集成的难度越来越大。

根据集成的元器件是否采用同种材料,PIC 可以分为混合集成和单片集成。混合集成是将使用不同材料、不同制作工艺制造出来的元器件组合安装在同一衬底上,它的优势是能够实现无源光波导与有源器件之间较自由的结合。然而,不同元器件间需要精密的位置调整与固定,加之不同材料在光学、机械和热特性等方面存在差异,都将加重封装的复杂性和成本,并限制集成规模^[9]。单片集成是经过相同制作工艺,将不同元器件集成在同一衬底上的一体化技术,实现起来有较大技术难度,但具有结构紧凑、尺寸小、功耗低、可靠性强等优势,是 PIC 的发展方向。表 1 对比了两种集成形式以及分立器件组合的差异。目前在光通信系统中混合集成和单片集成器件都在使用,前者使用较多,单片集成也已经进入量产。

表 1 混合集成与单片集成的差异对比

功能	集成形式		
	分立器件组合	混合集成	单片集成
集成不同材料	+++	++	+
集成不同功能	+++	+++	+++
低耦合损耗	+	++	+++
高可靠性	+	++	+++
易封装	+	++	+++
小尺寸	+	++	+++
低功耗	+	++	+++

根据集成的元器件数量,光子集成可分为小规模 PIC、中等规模 PIC 和大规模 PIC,通常指单片集成的功能元器件数量在 10 个以内、10~50 个和超过 50 个^[4]。大规模 PIC 是未来主流的发展方向。

2.2 材料及制作工艺

光子集成的材料丰富多样,主要包括以下几类:铌酸锂(LiNbO₃)晶体、聚合物、光学玻璃、绝缘硅(SOI)、二氧化硅/硅(SiO₂/Si)、氮氧化硅/二氧化硅(Si₃N₄/SiO₂)以及Ⅲ-V 族化合物半导体。铌酸锂晶体具有较好的电光调制特性,主要应用于高速光调制器,但不能实现激光激励和探测。聚合物波导的热光系数较高,适合于制备热光调制的动态器件,可大幅降低功耗。玻璃波导具有较低的传输损耗和与光纤的耦合损耗,成本低廉,是目前平面光波导(PLC)光分路器的主要材料。硅材料和Ⅲ-V 族材料对实现大规模 PIC 更有优势,图 2 总结了几种材料的特性以及匹配的光器件^[5]。硅材料在电子集成电路中应用广泛,成本低廉、性能稳定、工艺成熟,适合规模化生产。在 PIC 领域,由于硅是间隙能带材料,禁带宽度较大,发光效率和光电效应很弱,目前主要应用于无源器件^[6~8],基于硅材料的探测器、调制器等有源器件近几年也取得了一定突破^[9~11]。硅有源器件最大的挑战是制作通信波段的光源,目前尚没有确定的技术路线,Intel 等研究机构尝试采用受激拉曼辐射等方法实现硅基激光器,但由于受到双光子吸收诱导自由载流子增加,波导吸收损耗变大,无法实现高效的自激放大^[12,13]。砷化镓(GaAs)主要应用于 850 nm 波长范围,适用于局域网,在长距离、大容量传输系统应用中受到限制。磷化铟(InP)是稀



	SOI	SiO ₂ /Si	Si ₃ N ₄ /SiO ₂	InP/GaAs
低传输损耗				
低耦合损耗				
电光效应				
热光效应				
发光				
光放大				
小尺寸				
与CMOS兼容				

(a) 材料特性

	SOI	SiO ₂ /Si	Si ₃ N ₄ /SiO ₂	InP/GaAs
光波导		+	+	
Y分支耦合器		+		+
平等波导耦合器	+			
MMI耦合器			+	+
光开头			+	
调制器				
微环	+		+	
AWG		+		
SOA				+
激光器				+
探测器	+			+

(b) 匹配器件

图2 光子集成材料的特性及匹配器件
(+为最佳匹配器件)^[5]

有材料,外延片尺寸也小于硅材料,目前普遍采用的InP外延片为2英寸和3英寸,而电子集成电路中硅晶圆直径已达到12英寸,Intel、TSMC和Samsung在2012年入股光刻机厂商ASML,正在联合研发18英寸硅晶圆生产技术。虽然InP在成本、规模化生产能力方面逊色于硅,但它是目前唯一能够实现通信波长大规模单片集成的材料。综上所述,由于不同的器件功能对所用材料的性能要求有较大差别,器件的工作机理和结构也大不相同,在PIC领域尚未找到一种理想的基础材料,能够像电子集成电路中采用硅材料那样众望所归。

在制作工艺方面,铌酸锂和玻璃波导主要基于扩散、离子交换或质子交换工艺。硅材料和Ⅲ-V族化合物半导体主要基于半导体制造工艺。硅材料的制备技术主要包括:热氧化和等离子体增强化学气相沉积(PECVD)工艺。Ⅲ-V族化合物半导体材料制备技术主要包括:传统的气相外延(VPE)、液相外延(LPE)、分子束外延(MBE)和金属有机化学气相沉积(MOCVD)工艺,其中,MOCVD由于生产设备相对简单、造价低、可按任意比例控制合成材料、适合规模生产等优势,得到学术和产业界的广泛认同。

2.3 关键技术

除了基础的材料制备技术之外,PIC的关键技术还体现在以下几个方面。

(1) 功能单元微结构制作和波导连接技术

将不同材料的功能单元集成到一起或在同一衬底材料上同时实现多种功能单元,一直是PIC技术的关键和难点,涉及很多结构与工艺的兼容性问题。PIC设计时也不能

拘泥于追求单个功能单元的具体性能指标,要力争整体性能最大化。功能单元的微结构制作技术主要包括湿法腐蚀和干法刻蚀。此外,不同功能波导间的连接需要具有低损耗和折射率匹配特性,在外延片的不同区域生长带隙不同的半导体材料是PIC的基础工艺之一。目前,波导连接技术主要包括波导对接生长^[14]、选择区域生长^[15]和量子阱混杂^[16]等。

(2) 硅基光子集成和混合集成技术

根据有源器件的实现方式,硅基PIC可分为单片集成和混合集成两种。硅基单片集成通常会用到硅上锗材料,例如锗—硅调制器和锗光探测器^[10,11],因而硅上长锗是其重要基础工艺,由于两者之间存在4%的晶格失配,锗生长过程中容易产生缺陷,进而降低器件的性能。混合集成是将具有不同功能、不同材料的芯片,如Ⅲ-V族激光器、调制器、探测器,通过焊接或键合技术在物理上与硅材料组成一个整体。目前,键合技术主要有晶圆级键合^[17]和芯片级键合^[18]两种方式,前者具有大规模加工和生产的优势,后者具有成本低、易于操作的优点,但也存在精度低、难批量生产的限制。

(3) 光电集成电路(OEIC)技术

在一枚芯片上同时集成光和电是业界追求的终极目标。OEIC的技术要求比PIC更为苛刻,需要在同一衬底材料上对光、电功能单元同时进行优化,存在着结构设计、前后工序之间的相容性问题。OEIC整体上仍处于研究开发阶段,目前主要应用于集成有源器件及其外部驱动电路。

3 产业发展研究

3.1 产业发展驱动力

总体上说,PIC是为满足市场对低功耗、低成本、高密度和高可靠性的需求而出现的,其中,低成本是最根本的驱动力。器件、模块商通过PIC可降低封装、耦合等制造成本;运营商通过PIC可降低功耗、机房占用面积、系统开通和升级难度等运维成本。在细分领域,大容量高带宽光传输、小型化低成本光接入、高密度高带宽光互联是目前PIC产业最强劲的驱动力。

(1) 大容量、高带宽光传输

传统的WDM系统普遍采用分立元器件,随着网络扩容,器件的数量和功耗都大幅提高。PIC能够在增加WDM系统带宽的同时,降低单位成本和功耗^[19]。在100 Gbit/s领

域,Infinera 提出的 10×10 Gbit/s PIC 方案虽未获得广泛支持,但已锋芒初露,掀起业界的 PIC 研发热潮。随着速率提升至 400 Gbit/s 和 1 Tbit/s,调制码型将更为复杂,系统对高集成度、低功耗和低成本的需求更加迫切。纵观 IEEE/ITU-T 标准制定、主流设备商样机研制、典型运营商现网试点等诸多 400 Gbit/s 技术及产业发展动态,400 Gbit/s 实现商用的可能性不断增加,预计到 2016 年左右,市场定位将逐步清晰,届时设备商将会考虑大量采用 PIC 技术。

(2) 低成本、小型化、高可靠性光接入

目前,用户终端(ONU)成本占据 FTTH 端到端有源设备成本的 90%以上,终端成本过高将成为 FTTH 普及部署的一大障碍。PIC 可以满足 ONU 小型化、低成本、高可靠性的需求,在未来 FTTH 部署中发挥重要作用。同时,基于 PLC 的光分路器和 AWG 无源光器件已普遍应用于宽带接入领域,并有逐步向城域及骨干网延伸的趋势。

(3) 高密度、高带宽光互联

云计算的发展极大地促进了数据中心网络流量的快速增长,板卡间电互联面临带宽、时延和功耗等诸多挑战,光互联已成为一种极具发展潜力的替代方案。光互联对尺寸、功耗和成本都非常敏感,正是 PIC 的用武之地。另一方面,随着微处理器性能呈指数增长以及电子集成电路技术日益逼近极限,计算机系统内部通信速度和带宽落后于处理器芯片运算速度的趋势不断扩大,芯片的提速需要芯片间和芯片内的通信速度大大加快,PIC 的应用范围将进一步扩大到芯片间和芯片内部互连。

3.2 产业发展现状

PIC 的概念最早由贝尔实验室的 Miller S E 在 1969 年

提出^[20],受制于固有技术问题,PIC 商品化的进程十分缓慢。概念提出 25 年后,才出现了只集成无源器件的小规模 PIC 产品。35 年后,大规模 PIC 才取得重要突破,代表性产品即 Infinera 的 100 Gbit/s 光发射和接收芯片。近几年,随着技术的逐渐积累以及产业需求的旺盛,PIC 产业才进入较快发展时期。目前,中小规模 PIC 已经成熟并取得广泛商用,常见的产品主要有无源 PIC,如光分路器、AWG、光开关阵列、VOA 阵列等以及有源 PIC,如激光器与电吸收调制器集成产品(EML)、激光器与马赫—曾德尔调制器集成产品、激光器阵列和探测器阵列等,Finisar、JDSU、NeoPhotonics 等业界主流的光器件厂商均有成熟产品。Infinera 是大规模 PIC 技术及产业的引领者,其第三代产品已达到 500 Gbit/s 的速率,可实现超过 600 个元器件的单片集成,下一代产品将瞄准 1 Tbit/s^[22]。图 3 为光子集成发展历程。

在市场方面,北美地区 PIC 的需求比例最大,占有全球 40%的份额;欧洲地区位列第二;亚太地区增长较快,年复合增长率高达 35%。PIC 的参与企业涵盖多个领域,主要包括:Infinera、Alcatel-Lucent、华为、Ciena、Cisco 等系统设备制造商,OneChip Photonics、Enablence、Finisar、JDSU、NeoPhotonics、Avago、Emcore、Oclaro、Luxtera、KAIAM、Aifotec 等芯片/器件/模块制造商以及 Mellanox、Intel、IBM 等解决方案和综合服务提供商。从材料体系上划分,主流 PIC 企业分为 InP 和 Si 两大阵营,以 Infinera 和 OneChip Photonics 为代表的公司力推 InP 基 PIC,并在产品和市场方面取得了较大突破,代表性产品如 Infinera 和 OneChip Photonics 分别推出的光发射/接收芯片。另一方面,以 Luxtera、Intel、IBM 和 Cisco 为代表的公司则认为 Si 基 PIC 最具成本和规

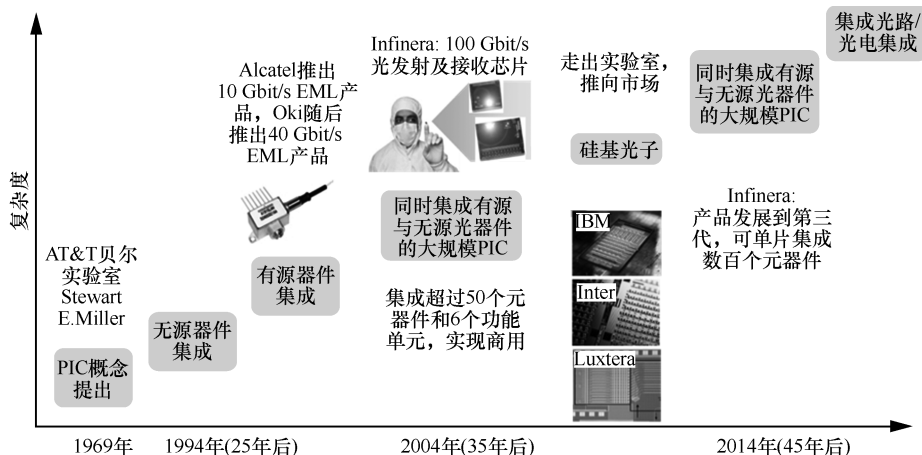


图3 光子集成发展历程



模效益,将光子和微电子技术融合,可以使全球历时数十年,投入数千亿美元打造的微电子制造基础设施及技术积累投入 PIC 领域,大幅提高 PIC 产业水平。代表性技术产品如 Luxtera 公司推出的基于 CMOS 工艺的 AOC 芯片, Cisco 推出的应用于 100 Gbit/s 客户侧的 CPAK 光模块以及 Intel 公司致力研发的混合集成激光器和芯片级光互联技术。目前硅基 PIC 的市场规模较小,主要发展障碍依然是固有技术问题,且在短期内难有实质性的突破。

4 发展挑战、前景与策略

PIC 在技术和产业方面已取得了一定进展,但在大规模生产能力、集成度和规模商用方面仍然存在很多挑战,与电子集成电路有一定差距。首先,电子集成电路由于功能单元结构一致,制作工艺相同,随着硅材料工艺和微细加工技术的进步,发展速度较快;而 PIC 各个功能单元对材料和结构的要求都不尽相同,缺乏像电子集成电路那样标准化的设计和制作工艺。其次, PIC 产品的一致性要求较高,功能越复杂要求越苛刻,在生产的重复性和流程控制方面也无法与电子集成电路比拟,导致成品率较低且价格昂贵。另外, PIC 与电子集成电路的集成度同比相差 $10^6 \sim 10^7$ 倍,电子集成电路技术在 22/20 nm 工艺制程之前,基本沿 Moore 定律预测发展,“特征尺寸”不断减小,集成规模急剧增加,价格同步快速下降,而 PIC 目前尚无明确的发展路线图或时间表。最后, PIC 目前的规模化行业应用不足,高昂的研发成本和较长的研发周期致使进入该领域的企业有限,产业链较为薄弱。

尽管 PIC 目前仍处于初级发展阶段,但其成为光器件的主流发展趋势已成必然,近几年的发展速度亦有目共睹。随着基础材料制备、器件结构设计、核心制作工艺等核心关键技术的突破,加之产业需求的急剧升温,特别是光互联、超 100 Gbit/s 高速传输系统和 FTTH 接入终端对小尺寸、低功耗和低成本的强劲驱动, PIC 在未来几年将迎来更快的发展,集成度和大规模生产能力逐步提升,成本不断下降,产业链进一步完善,并引发光器件、系统设备,乃至网络和应用的重重大变革。

硅光子是近年来光通信学术和产业界研究的热点,硅基 PIC 目前主要应用于无源光器件,有源器件仍然以混合集成为主,全硅单片集成的实现尚需时日。目前硅基 PIC 主要面向数据中心的短距离互联,在长距高速应用中,将会遇到波长稳定性等技术挑战。近期来看,硅基 PIC 将成

为光子集成领域不可缺少的一部分,但取得颠覆性突破的可能性不大。InP 材料虽然在成本、规模化生产能力方面逊色于硅,但它是目前唯一能够实现通信波长大规模单片集成的材料,在未来一段时间内,特别是在长距高速传送领域,将具有旺盛的生命力。

目前,全球多个国家都在对 PIC 进行大力投入,成果较为突出的研究机构集中在欧洲、美国和日本。在我国, PIC 也得到了越来越多的重视,相继获得多项国家重大科研计划的支持,在基础理论方面取得了一定进展。然而,受技术水平和工艺条件的限制,国内的研发主体主要集中在中科院半导体所、微电子所、光迅、华为、成都马尔斯、上海圭光等少数研究机构和企业,技术研究与实用化方面与国外存在较大差距。长期以来,光器件一直是我国光通信产业的短板,核心、高端产品依赖进口,是亟待解决的战略性、基础性问题。光子集成是光器件,乃至整个光通信产业革命的核心部分,我国应抓住这一技术产业变革契机,布局人才储备,注重基础工艺积累,推进 PIC 核心技术的研发与突破。一方面,从国家层面应对 PIC 予以积极扶植和大力投入,提供良好的政策环境;另一方面,企业等研发主体也应积极拓展融资渠道,形成发展合力,强壮 PIC 产业群体,从而大幅提升我国光器件国产化水平和自主创新能力。

5 结束语

光子集成是未来光器件的主流发展方向,经过多年积累已取得较大进展,很多产品被成功开发并应用,近几年进入快速发展时期。本文首先从技术和产业两个层面对 PIC 展开全面研究。在技术层面,总结并比较了 PIC 的不同分类方式;对 PIC 的材料特性、制作工艺以及每种材料适合制备的光器件种类进行了探讨;分析了 PIC 的关键技术和实现难点。在产业层面,讨论了 PIC 的产业发展驱动力,重点介绍 PIC 在传送网、接入网和光互联领域的迫切需求。其次,从产业发展历程、产品种类、市场应用和主要参与企业等多个角度梳理了 PIC 产业的发展。最后,分析了 PIC 目前面临的主要挑战和未来应用前景,并探讨我国 PIC 技术及产业发展的策略建议。

参考文献

- 1 Nagarajan R, Joyner C H, Schneider R P, *et al.* Large-scale photonic integrated circuits. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(1)

- 2 Welch D F, Kish F A, Mella S, *et al.* Large-scale InP photonic integrated circuits: enabling efficient scaling of optical transport networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(1)
- 3 Photonic integrated circuits: a technology and application primer. http://go.infinera.com/WP-Photonic_Integrated_Circuits_Reg.html, 2014
- 4 李俊杰. 光子集成技术的发展及其对 WDM 系统的影响, 电信科学, 2008(5)
Li J J. Photonic integration technology development and its impact on the WDM system. *Telecommunications Science*, 2008(5)
- 5 Improve your products with photonic integrated circuits. http://www.vlcp Photonics.com/technologies/VLC_Photonics_whitepaper.pdf, 2014
- 6 Doerr C R. Advances in silica planar lightwave circuits. *IEEE Journal of Lightwave Technol*, 2006(12)
- 7 Marxer C, Griss P, Rooij N F de. A variable optical attenuator based on silicon micromechanics. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999(2)
- 8 Kozhevnikov M, Basavanthally N R, Weld J D, *et al.* Compact 64×64 micromechanical optical cross connect. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003(7)
- 9 Green W M, Rooks M J, Sekaric L, *et al.* Ultra-compact, low RF power, 10 Gbit/s silicon Mach-Zehnder modulator. *Opt Express*, 2007, 15(25)
- 10 Nishi H, Kou R, Hiraki T, *et al.* 22-Gbit/s×16-ch WDM receiver based on a Si-Ge-silica monolithic photonic platform and its application to 40-km transmission. *Proceedings of OFC2013 Anaheim Convention Center, Anaheim, CA, USA*, 2013
- 11 Kang Y M, Liu H D, Morse M, *et al.* Monolithic germanium/silicon avalanche photodiodes with 340 GHz gain-bandwidth product. *Nature Photonics*, 2009(1)
- 12 Rong H S, Liu A S, Jones R, *et al.* An all-silicon raman laser. *Nature*, 2005(433)
- 13 Rong H S, Jones R, Liu A S, *et al.* A continuous-wave Raman silicon laser. *Nature*, 2005(433)
- 14 Strzoda R, Ebbinghaus G, Scherg T, *et al.* Studies on the butt-coupling of InGaAsP waveguides realized with selective area metal organic vapor phase epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, 1995(1)
- 15 Aoki M, Suzuki M. InGaAs/InGaAsP MQW electro absorption modulator integrated with a DFB laser fabricated by a band-gap energy control selective area MOCVD. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993(6)
- 16 Skogen E J, Raring J W, Morrison G B, *et al.* Monolithically integrated active components: a quantum-well intermixing approach. *IEEE Journal Selected Topics in Quantum Electron*, 2005(2)
- 17 Liang D, Bowers J E, Oakley D C, *et al.* High-quality 150 mm InP-to-Silicon epitaxial transfer for silicon photonic integrated circuits. *Electrochemist Solid State Letter*, 2009(4)
- 18 Pittroff W, Erbert G, Beister G, *et al.* Mounting of high power laser diodes on boron nitride heat sinks using an optimized Au/Sn metallurge. *IEEE Transactions on advanced Packaging*, 2001(4)
- 19 The benefits of photonic integration in next-gen transport & switching systems. http://go.infinera.com/WP-Benefits_Photonic_Integration_Next-Gen_Transport_Switching_Systems_Reg.html, 2014
- 20 Miller S E. Integrated optics: an introduction. *Bell System Technical Journal*, 1969(7)
- 21 Nagarajan R, Joyner C H, Schneider R P, *et al.* Large-scale photonic integrated circuits. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005(1)
- 22 Photonic integration. http://go.infinera.com/WP-Photonic_Integration-Registration.html, 2014

[作者简介]



吴冰冰,女,博士,工业和信息化部电信研究院通信标准研究所工程师,主要研究方向为光电子器件、高速光传输与光网络、光信号处理技术。



赵文玉,男,博士,工业和信息化部电信研究院通信标准研究所主任工程师,主要研究方向为 40 Gbit/s, 100 Gbit/s WDM、OTN 等光传送网新技术研究、标准制订以及系统测试评估。



张海懿,女,工业和信息化部电信研究院通信标准研究所高级工程师、部门主任,主要研究方向为光传输系统、OTN、PTN、WDM 系统、SDH 系统、MSTP、自动交换光网络以及电信传送网络体制标准、运营商技术咨询。