

硅基片上光互连技术

刘 柳*, 周 习

(华南师范大学光及电磁波研究中心, 信息光电子科技学院, 广东广州 510006)

摘要:综述了近年国际上有关硅基片上光互连技术的进展, 介绍了一些相关器件, 如实现波分复用型片上光互连系统的关键器件: 波导、波分复用/解复用器、激光器、探测器、调制器以及光交换器. 并结合作者的研究结果讨论了这些器件的工作原理以及性能特点.

关键词:硅光子学; 光互连; 异质集成; 低温键合

中图分类号: TN491

文献标志码: A

doi: 10.6054/j.jscn.2012.05.001

在过去的几十年中, 基于硅材料的微电子技术 (CMOS, Complementary Metal Oxide Semiconductor) 取得了辉煌的成就, 深刻地改变了人们生产生活的各个方面. 虽然如今的 CMOS 技术仍然以摩尔定律 (CMOS 芯片单位面积的三极管数量每 24 个月翻一倍) 的速度在发展^[1], 但预见将来, 这一发展速度将会遇到一个瓶颈, 即: 互连瓶颈. 其原因在于, 随着器件尺寸的减小, 各个三极管之间的数据交换 (即: 互连) 速度已经跟不上三极管本身的数据处理速度^[2]. 并且这种数据交换也将耗费大量的能量. 比如, Intel 的 Nehalem-EX 系列微处理器包含 8 个中央处理器核, 片上多核互连带宽达到 1.024 Tpbs, 全局互连功耗占到整个系统功耗的 30%~50%. 因此未来超大规模处理器内部数据交换急需一种功耗低、带宽高的互连技术. 片上光互连的概念最早由 GOODMAN 在 1984 年提出^[3]. 作为一种新的互连方式, 光互连具有许多电互连不可比拟的优点, 如: 时空带宽积高、高度的并行性和无干扰性、损耗小等优点. 在高性能 CPU、高性能计算机、高速信息处理系统中, 用光互连替代电互连, 已成为人们的共识. 近十年来, 由于其重大的工业意义和市场前景, 国际上的一些知名高校和企业, 如: 美国麻省理工学院、康乃尔大学、IBM 公司、Oracle 公司等, 都已经开展了光互连技术的研究.

在各种光互连方案中, 硅基光互连技术被认为是最有发展前途的一个方案. 硅材料已经被广泛应

用于 CMOS 集成电路, 其结构制作工艺成熟, 可进行大规模、低成本生产. 另外, 硅材料在光通信波段 (波长在 1 310 nm 或 1 550 nm 附近) 也具有非常优秀的光学性质: 吸收损耗非常低、折射率很高. 基于以上原因, 硅基光集成器件有尺寸小、功耗低、同 CMOS 工艺兼容、可集成、成本低等优点, 是实现片间和片上光互连的理想平台. 并且, 由于采用与集成电路兼容的工艺制作, 可以方便地在电学芯片的内部引入硅基集成光路, 实现光通信电路与控制电路和驱动电路的紧密集成, 进一步降低成本.

在过去的几年中, 国内外的研究人员研制出了各种无源和有源的硅基集成光电子器件, 如: 低损耗的单模硅纳米线波导、波分复用器和解复用器、高速光调制器、高速光开关、高速光探测器等等. 一些初步的硅基光互连系统方案和实现也被相继提出. 除此之外, 电泵浦激光器也许是唯一一个如今还没能在纯硅材料上得以实现的一种重要光子器件. 单晶硅是一种间接带隙材料, 电子-空穴的辐射复合必须借助声子的参与才能进行, 因而效率很低. 相比而言, 借助缺陷或者复合中心的非辐射复合则更容易发生. 这就使得硅发光器件的内量子效率非常低. 此外, 硅还存在有自由载流子吸收效应, 这也严重阻碍了光放大. 因此, 单晶硅通常不适合做高效的激光器、发光二极管等有源光器件. 如今, 一种比较好的解决方案是使用其他发光材料 (如: III-V 化合物半导体或锗) 与硅相结合的方法. 我们将会在下文中详细介绍上面提到

收稿日期: 2012-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61107020); 国家高技术研究发展计划 (863 计划, 2012AA012201); 广东省高等学校引进人才专项资金项目

* 通讯作者, liuliuliu@senu.edu.cn

的这些具有代表性的器件和技术方案。

我们研究的片上光互连系统如图1所示。在发射模块方面,连续输出激光首先通过一个片上强度调制器,将需要传输的电信号转换成光信号。之后,若干通道的光信号(波长不同)通过一个波分复用器集合到一根波导中进行传输。在接收模块方面,首先使用一个解复用器件不同波长的光信号在空间上分开,然后再通过一个高速探测器将每个通道的光信号转换成电信号。光互连系统中的每一个节点,都由上述的发射和接收模块构成。各个节点之间由一个光开关阵列联系成一个具有交换功能的光互连系统。这里我们使用了波分复用技术,用来增加单个节点数据吞吐速率。考虑到使用波分复用技术的电互连速率有希望达到1 Tb/s,因此光互连要想在传输速率上优于电互连,波分复用技术可能是必要的。

图1 波分复用片上光互连系统示意图

Figure 1 Schematic of WDM piece of glazing interconnection system

1 单模硅波导

硅基光波导的种类很多,用于片上光互连的波导需要满足以下条件:较小的损耗;较小的截面尺寸和较小的弯曲半径,即要求波导材料的芯层和包层具有较大的折射率差;单模工作;必须与硅工艺或CMOS工艺兼容。常见硅波导多采用浅刻蚀脊形波导结构^[4]。该波导在横向上仍然是弱限制,因此模板尺寸较大,与单模光纤和边发射型激光器的耦合损耗较小,适用于长距离光通信系统。但这种波导结

构的弯曲半径需要很大,因此不适合于本文所讨论的需要高度集成的片上光互连应用。

近几年,一种新型的深刻蚀矩形单模硅波导引起了研究者的关注^[5-7],其结构和基模如图2所示,图中硅波导的高度为250 nm,宽度为500 nm。这种波导以二氧化硅层为衬底、单晶硅为芯层、空气或者是其他低折射率材料(如:二氧化硅、氮化硅、聚合物等)为上包层。由此可见,这种波导在各个方向上的折射率差都比较大,在单模条件下,尺寸非常小,约为几百纳米,因此也常被称为硅纳米线波导^[8]。另外,实验测得,当这种波导的弯曲半径为1 μm 时,90度的弯曲损耗仅为0.086 dB^[9]。并且,当2个平行波导相距超过1.6 μm 时,其相互耦合基本可以忽略^[10],非常适合紧密集成。但由于这种波导尺寸很小,需要使用高分辨率的曝光工艺来制作,如:深紫外曝光、电子束曝光等等。并且在这种尺度上,波导的传输损耗主要来自于波导侧壁粗糙引起的散射损耗。因此,高精度、高分辨率的加工工艺对于硅纳米波导和器件来说尤为重要。比利时根特大学的研究者们使用深紫外曝光和标准的CMOS工艺制作了截面尺寸约450 nm $\times$ 220 nm的硅纳米线波导,其损耗约为2.4 dB/cm^[6];英国圣安德鲁斯大学的研究者使用一种新型的掩膜材料(HSQ, Hydrogen Silsequioxane)和电子束曝光技术,首次将硅纳米线波导的损耗控制在1 dB/cm以下^[11]。对于片上光互连系统来说,芯片的尺寸一般为几个厘米,这个量级的损耗是可以接受的。因此,综合以上这些因素,这种硅纳米线波导是片上光互连系统的最佳选择之一。值得一提的是,除了以上所说的单晶硅波导来说,我们和其他一些研究小组还利用各种沉积工艺,制作了多晶硅或无定形硅的纳米线波导^[12-14]。这种沉积型的硅波导,不受基底材料的限制,比如:

图2 硅纳米线波导横电(TE)基模的模场图

Figure 2 Mode field figure of silicon nanowires waveguide horizontal electric(TE) base model

可以制作在完整的 CMOS 芯片层之上,因此具有相当的应用价值.但这种波导的稳定性和损耗等性能还有待进一步的提高^[14].

2 波分复用器

波分复用是提高光互连单个通道带宽的最有效、最直接的方法,在当下的远距离通信领域已经成为一种主导技术.实现波分复用的光集成器件结构主要包括阵列波导光栅(AWG)、刻蚀衍射光栅(EDG)、微谐振环(MRR)等.他们不仅是实现密集波分复用的核心功能器件,也是构造更多复杂模块的重要组成,例如多波长光探测器、 $N \times N$ 路由器等,应用极为广泛,也极为重要.尤其是阵列波导光栅已经在产品化方面非常成功,在密集型波分复用系统与模块中占据重要地位.日本的研究小组,早在2005年就报道了一种超小尺寸的阵列波导光栅($70\text{ }\mu\text{m} \times 60\text{ }\mu\text{m}$)^[15],但性能尚有不足,如插入损耗较大,且通道间隔很大(约为 11 nm);本文作者使用一种新型的交叠式自由传播区设计,获得了当时世界上最小的阵列波导光栅(4通道器件约为 $40\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$)^[16];比利时根特大学应用各种新型设计,实现了插入损耗仅为 1 dB 、串扰小于 -25 dB 的8通道硅基阵列波导光栅,是至今为止性能最好的硅纳米线阵列波导光栅^[17].最近几年,刻蚀衍射光栅型波分复用器件也在硅基上得以实现^[18-19].但是,这种器件的通道间隔一般比较大(几十到一百纳米),通常被应用于光纤到户系统中,用来分离该系统中的上行和下行通道. IBM 的研究者使用双无像散点的设计,研制了一种通道间隔仅为 3.2 nm 的刻蚀衍射光栅器件^[20],但与同规格的阵列波导光栅相比,其插入损耗仍然较大.除此之外,使用微谐振环阵列也可以构成波分复用器件,并且理论上这类器件的尺寸和通道间隔可以做到更小.就这一点来说,更加适合于片上光互连系统.但是,由于各个微谐振环相对独立,如果要保证各个通道的性能相同,就对加工工艺的准确性和一致性提出了很高的要求.美国普渡大学研究者使用双谐振环平顶响应设计,演示了一个8通道的波分复用器件,但器件性能,如:均匀性、通道间隔、插入损耗等,与前述的阵列波导光栅和刻蚀衍射光栅相比,仍然差距较大^[21].

3 激光器

如前所述,硅基激光器是硅光电集成器件中的难题之一.2005年,Intel公司的研究者首次成功演示了基于纯硅的连续激光器^[22],引起了国际上的广泛关注.该激光器应用了硅中较强的拉曼放大效应,其输出波长由泵浦激光和硅材料的斯托克斯位移共同决定.这种拉曼激光器不可避免地需要一个强泵浦光源,通常是通过一个外接激光器来实现,这对于片上光互连系统来说不大现实.

片上光互连系统需要的是电泵浦的微型激光器.比较有前途的方案是通过异质集成,在器件加工的前端,结合其他各种发光材料,如:稀土元素、发光量子点材料、III-V化合物半导体等.前2种方法至今仍未实现对 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 或 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 波段信号的净增益(net gain)^[23-24].另一方面,III-V化合物半导体(如:InAlGaAsP)已经被广泛应用于制作各种光放大器以及激光器等,不管是在材料性能、器件设计,还是加工制作上,都已相对成熟.也促使很多学者们致力于研究如何结合III-V半导体和硅材料.直接在硅片上外延生长III-V材料有一定难度,因为这两者的晶格常数和热膨胀系数相差很大^[25].直到如今,仍没有好的解决方案,该方向发展相对缓慢.基片键合是一种常用的实现相同或不同材料结构之间高质量异质集成的方法.几年前,比利时Gent大学以及美国加州大学圣巴巴拉分校(UCSB)的研究者们,分别独立地解决了传统基片键合中的键合层厚度较大、基片材料性质差异大等技术难题,成功将低温键合的方法应用到III-V半导体与硅的异质集成上^[26-27].这种异质集成的方法(图3)是将一片生长好的III-V外延基片通过一定的方法(化学激活二氧化硅表面或使用聚合物黏附层)键合到硅基片上去;而后,去除III-V基片,仅留下所需的平面外延层;最后再在该外延层上制作有源器件.这里描述的是芯片与基片键合的方法,但同样也适用于2个同样大小的基片之间的键合.在这种方法中,III-V外延层在键合时还是一个平面,并不具有器件结构,因此不需要对准.之后的有源器件是通过光刻对准的方式制作的,可以具有很高的精度和集成度.通过该方法,连续单模工作、电泵浦的硅基激光器得以实现^[28-29].其激光输出功率可以超过 5

mW^[28],尺寸在某些情况下可以小于 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ ^[29]. 这种 III-V 半导体与硅低温键合方法可以说是目前解决硅基光放大这一难题的最成功和最有前途的方案之一. 本文作者使用这种低温键合的方法,制成了微型硅基多波长激光器,非常适用于波分复用型光互连系统^[29]. 我国北京大学的研究者使用

了一种金属键合方法制备出硅基激光器,在硅波导中得到了稳定的连续激光输出^[30]. 与前述的方法不同的是,这种金属键合方法中,硅波导和 III-V 激光器结构分别制作,因此在键合时需要高精度的对准,对键合工艺提出了较高的要求.

图3 III-V 半导体与硅低温键合工艺流程

Figure 3 Low temperature bonding process between III-V semiconductor and silicon

另外,值得一提的是,2010年,美国麻省理工学院的研究者成功研制出了一种硅基锗材料激光器^[31],引起了国际上的广泛关注. 锗也是一种 IV 族半导体材料,与硅的性质非常相近,并且已经广泛应用于 CMOS 工艺中,因此锗硅激光器具有相当的实用性. 通常来说,制作锗硅激光器有以下 2 个难题:首先,普通的锗仍然是一个间接带隙材料,发光效率仍然很低;其次,虽然锗与硅的晶体结构一致,但两者的晶格常数仍存在约 3.96% 的差异. 美国麻省理工学院的研究者使用选区外延生长的方法,在硅衬底上制备了高质量的锗薄膜;并且对于这层锗薄膜进行 n 型重掺杂和施加适当的拉伸应变. 这些措施大大增强了锗的发光效率,由此获得了室温下的硅基锗材料激光器. 虽然文中仍然使用光泵浦,并且只获得了脉冲模式下的激光^[31],但这项开创性的研究仍然具有重要意义.

4 探测器

硅基探测器所面临的问题从本质上讲主要有 2 点:第一,硅材料在波长大于 $1.1\ \mu\text{m}$ 后即为透明,在通讯波段失去探测能力;第二,硅材料中的载流子迁移速率较低,导致其间难以实现高速反应. 因此与激光器类似,硅基探测器也需要借助其他材料. 前文所提到的锗材料的最大吸收波长可到约 $1.59\ \mu\text{m}$,因此也被广泛应用于硅基探测器. 美国 Intel 公司、IBM 公司、Sun 公司(现 Oracle 公司)、康乃尔大学,法国的 Leti 研究院使用各种方法制备了硅基锗探测

器,器件带宽都达到 30 GHz 以上,已具有相当的实用性^[32-36]. 特别值得一提的是,IBM 公司将锗探测器的制作过程完全集成到标准 CMOS 工艺中,实现了光探测器与电子驱动器和放大器的单片集成^[36].

除了锗材料以外,III-V 化合物半导体(如:In-GaAs)探测器已经广泛地应用于远距离光通讯. 本文作者以及美国加州大学圣巴巴拉分校的研究者,使用与硅基激光器类似的低温键合的方法,制备了硅基 III-V 探测器,内量子效率都达到了 80% 以上^[37-38]. 由于与激光器采用类似的工艺,硅基 III-V 探测器的一个优势在于:可以与光放大器集成,构成一个具有光学预放大功能的硅基探测器^[39].

5 调制器

硅本身的电光系数很低,所幸的是,硅的自由载流子色散效应(硅的折射率与其中的自由载流子浓度有关)较为明显. 现在的纯硅基微型光调制器基本利用该原理制成. 从器件形式上来说,这种调制器又分为 2 种形式:一种是载流子注入型,一种是载流子消散型. 前者多采用正偏 PIN 二极管结构,而光场一般限制在 I 型区内. 通过改变二极管的正偏压,可以改变 I 型区中的载流子浓度,进而改变光场的相位. 这种方式的载流子浓度改变较大,因此器件的尺寸可以较小,如:美国康乃尔大学实现的硅基微环调制器,尺寸仅为 $12\ \mu\text{m}$ ^[40]. 但是载流子注入的时间相对较慢,因此器件的速度受到一定限制,如:上述的硅基微环调制器速度仅达到 1.5 Gb/s. 美国 IBM

公司的研究者使用一种预加重 (Pre-emphasis) 的驱动方法,增加载流子注入的速率,将这种注入型硅基调制器的速率提高到 10 Gb/s ^[41]. 与之相比,载流子消散型调制器的速率可以达到很高,如:美国 Intel 公司在 2007 年实现的硅基调制器速度达到 40 Gb/s ^[42]. 但是这种器件由于结构的因素,所能提供的载流子浓度改变较小,或载流子浓度改变区域与光模斑相比它小,因此,其器件结构相对较大,如:上述的 40 Gb/s 硅基调制器的尺寸超过 1 mm .

除了纯硅的调制器以外,研究者们还将其他具有更优异电光效应的材料,如:聚合物、锗等,集成到硅上,以获得性能更好的硅基调制器^[43-44]. 其中值得一提的是,我国浙江大学和美国加州大学圣巴巴拉分校合作,使用前文中多次提到的 III-V 和硅低温键合的方法,研制成了一种电吸收型的硅基调制器,其速度达到 50 Gb/s ,是目前世界上速度最快的硅基光调制器^[45].

6 光交换器

光交换器与光调制器的结构和原理非常相似,只是两者所注重的器件性能侧重点不同. 前述的光调制器注重于器件的速度,而对于器件在开/关状态下的消光比不是太在意;而光开关则对消光比以及器件的插入损耗要求较高,器件的速度则相对次要.

硅具有较显著的热光系数,早期的硅基光交换器多采用该原理制成^[46]. 我国中科院半导体所的研究者们,将多个硅基谐振环热光光开关组成一个 5 端口的路由器,实现对 12.5 Gb/s 的光信号进行片上路由^[47]. 但由于热光效应需要耗费的能量较高,且开关速度也较慢,通常在微秒至毫秒量级,因此,研究者们最近更多地倾向载流子注入型硅基光交换器. 该器件原理与载流子注入型调制器类似,也是利用硅的自由载流子色散效应. 美国 Sandia 国家实验室的研究者们使用微盘谐振腔,实现了消光比 15 dB 以上、开关速度 2.4 ns 左右的硅基光交换路由器^[48]. 但由于使用谐振腔结构,该器件的工作波长范围较小,仅为几个纳米. 美国 IBM 公司则使用马赫-曾德干涉仪的结构,所制成的硅基光交换路由器工作波长范围达到 110 nm ,开关速度也在几个纳秒,已具备一定的实用性^[49].

7 结论

硅基光电子器件在最近几年发展迅速,研究者们相继演示了一些基本的硅基光子器件,其性能也逐步提高,为片上光互连系统的实现奠定了坚实的基础.

参考文献:

- [1] MOORE G. Cramming more components onto integrated circuits [J]. Electronics, 1965, 38(8): 114-117.
- [2] MILLER D A B. Rationale and challenges for optical interconnects to electronic chips [J]. Proc IEEE, 2000, 88(6): 728-749.
- [3] GOODMAN J W, LEONBERGER F J, KUNG S Y, et al. Optical interconnections for VLSI systems [J]. Proc IEEE, 1984, 72: 850.
- [4] FISCHER U, ZINKE T, KROPP J R, et al. 0.1 dB/cm waveguide losses in single-mode SOI Rib waveguides [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1996, 8(5): 647-648.
- [5] TSUCHIZAWA T, YAMADA K, FUKUDA H, et al. Microphotonic devices based on silicon microfabrication technology [J]. IEEE Sel Top Quantum Electron, 2005, 11(1): 232-240.
- [6] DUMON P, PRIEM G R A, NUNES L R, et al. Linear and nonlinear nanophotonic devices based on silicon-on-insulator wire waveguides [J]. Jpn J Appl Phys, 2006, 45(8B): 6589-6602.
- [7] LIPSON M. Guiding, modulating, and emitting light on silicon - challenges and opportunities [J]. J Lightwave Technol, 2005, 23(12): 4222-4238.
- [8] 徐学俊,余金中,陈少武. SOI 纳米线波导和相关器件研究进展 [J]. 半导体光电, 2007, 28(1): 5-9.
- [9] YURRI V, SHAREE M. Losses in single-mode silicon-on-insulator strip waveguides and bends [J]. Opt Express, 2004, 12(8): 1622-1631.
- [10] DAI D, SHI Y, HE S. Characteristic analysis of nanosilicon rectangular waveguides for planar light-wave circuits of high integration [J]. Appl Opt, 2006, 45(20): 4941-4946.
- [11] GNAN M, THOMS S, MACINTYRE D S, et al. Fabrication of low-loss photonic wires in silicon-on-insulator using hydrogen silsesquioxane electron-beam resist [J]. Electron Lett, 2008, 44(2): 115-116.
- [12] LIU L, DAI D, DAINESI M, et al. Compact arrayed

- waveguide grating demultiplexers based on amorphous silicon nanowires [J]. *OSA Integrated Photonics Research and Applications/Nanophotonics*, 2006, 4(5): 24–28.
- [13] PRESTON K, SCHMIDT B, LIPSON M. Polysilicon photonic resonators for large-scale 3D integration of optical networks[J]. *Opt Express*, 2007, 15(25): 17283–17290.
- [14] KUYKEN B, CLEMMEN S, SELVARAJA S, et al. On-chip parametric amplification with 26.5 dB gain at telecommunication wavelengths using CMOS-compatible hydrogenated amorphous silicon waveguides[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(4): 552–554.
- [15] SASAKI K, OHNO F, MOTEGI A, et al. Arrayed waveguide grating of $70 \times 60 \mu\text{m}^2$ size based on Si photonic wire waveguides [J]. *Electron Lett*, 2005, 41(14): 801–802.
- [16] DAI D, LIU L, HE S. Design and fabrication of ultra-small overlapped AWG demultiplexer based on a-Si nanowire waveguide[J]. *Electron Lett*, 2006, 42: 31–32.
- [17] BOGAERTS W, LIU L, SELVARAJA S K, et al. Silicon nanophotonic waveguides and their applications[J]. *Proc SPIE*, 2008, 10(7134): 1–13.
- [18] ZHU N, SONG J, WOSINSKI L, et al. Experimental demonstration of a cross-order echelle grating triplexer based on amorphous silicon nanowire platform[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(3): 383–385.
- [19] BROUCKAERT J, BOGAERTS W, DUMON P, et al. Planar concave grating demultiplexer fabricated on a nanophotonic silicon-on-insulator platform[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(5): 1269–1275.
- [20] HORST F, GREEN W M J, OFFREIN B J, et al. Silicon-on-insulator echelle grating WDM demultiplexers with two stigmatic points [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 21(23): 1743–1745.
- [21] XIAO Shijun, KHAN Maroof H, SHEN Hao, et al. Multiple-channel silicon micro-resonator based filters for WDM applications [J]. *Opt Express*, 2007, 15(12): 7489–7498.
- [22] RONG H, JONES R, LIU A, et al. A continuous-wave Raman silicon laser[J]. *Nature*, 2005, 433(7027): 725–728.
- [23] JAMBOIS O. Towards population inversion of electrically pumped Er ions sensitized by Si nanoclusters[J]. *Opt Express*, 2010, 18: 2230–2235.
- [24] MOREELS I, GEYTER B De, THOURHOUT D Van, et al. Transmission of a quantum-dot-silicon-on-insulator hybrid notch filter [J]. *J Opt Soc Am B*, 2009, 26: 1243–1247.
- [25] KAWANAMI H. Heteroepitaxial technologies of III-V on Si[J]. *Sol Energ Mat Sol C*, 2001, 66: 479–486.
- [26] ROELKENS G, THOURHOUT D Van, BAETS R, et al. Laser emission and photodetection in an InP/InGaAsP layer integrated on and coupled to a silicon-on-insulator waveguide circuit[J]. *Opt Express*, 2006, 14: 8154–8159.
- [27] FANG A W. Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser[J]. *Opt Express*, 2006, 14: 9203–9210.
- [28] FANG W, LIVELY E, KUO Y H, et al. A distributed feedback silicon evanescent laser [J]. *Opt Express*, 2008, 16(7): 4413–4419.
- [29] LIU L, ROELKENS G, CAMPENHOUT J Van, et al. III-V/silicon-on-insulator nanophotonic cavities for optical networks-on-chip[J]. *J Nanosci Nanotechnol*, 2010, 10: 1461–1472.
- [30] HONG T. A selective-area metal bonding InGaAsP-Si laser[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22: 1141–1143.
- [31] LIU J, SUN X, CAMACHO-AGUILERA R, et al. Ge-on-Si laser operating at room temperature[J]. *Opt Lett*, 2010, 35: 679–681.
- [32] VIVIEN Laurent, OSMOND Johann, FEDELI Jean-Marc, et al. 42 GHz p-i-n Germanium photodetector integrated in a silicon-on-insulator waveguide[J]. *Opt Express*, 2009, 17: 6252–6257.
- [33] YIN T, COHEN R, MORSE M M, et al. 31GHz Ge n-i-p waveguide photodetectors on silicon-on-insulator substrate [J]. *Opt Express*, 2007, 15: 13965–13971.
- [34] LIAO Shirong, FENG Ningning, FENG Dazeng, et al. 36 GHz submicron silicon waveguide germanium photodetector[J]. *Opt Express*, 2011, 19: 10967–10972.
- [35] CHEN Long, LIPSON Michal. Ultra-low capacitance and high speed germanium photodetectors on silicon[J]. *Opt Express*, 2009, 17: 7901–7906.
- [36] ASSEFA S, SCHOW C, XIA F, et al. CMOS integrated optical receivers for on-chip interconnects[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2010, 16(5): 1376–1385.
- [37] SHENG Z, LIU L, BROUCKAERT J, et al. InGaAs PIN photodetectors integrated on silicon-on-insulator

- waveguides[J]. Opt Express, 2010, 18: 1756 – 1761.
- [38] PARK H, FANG A W, JONES R, et al. A hybrid Al-GaInAs – silicon evanescent waveguide photodetector [J]. Opt Express, 2007, 15: 6044 – 6052.
- [39] PARK H, KUO Y – H, FANG A W, et al. A hybrid AlGaInAs – silicon evanescent preamplifier and photodetector[J]. Optics Express, 2007, 15 (21): 13539 – 13546.
- [40] XU Q, SCHMIDT B, PRADHAN S, et al. Micrometre – scale silicon electro – optic modulator[J]. Nature, 2005, 435: 325 – 327.
- [41] GREEN W M, ROOKS M J, SEKARIC L, et al. Ultra – compact, low rf power, 10 gb/s silicon mach – zehnder modulator[J]. Opt Express, 2007, 15: 17106 – 17113.
- [42] LIAO L, LIU A, RUBIN D, et al. 40 Gbit/s silicon optical modulator for high speed applications[J]. Electron Lett, 2007, 43(22): 1196 – 1197.
- [43] LIU J F, BEALS M, POMERENE A, et al. Waveguide – integrated, ultra – low energy GeSi electro – absorption modulators[J]. Nature Photonics, 2008, 2: 433.
- [44] DING R, BAEHR – JONES T, LIU Y, et al. Demonstration of a low $V_{\pi}L$ modulator with GHz bandwidth based on electro – optic polymer – clad silicon slot waveguides [J]. Opt Express, 2010, 18: 15618 – 15623.
- [45] TANG Yongbo, CHEN Huiwen, JAIN S, et al. 50 Gb/s hybrid silicon traveling – wave electroabsorption modulator[J]. Opt Express, 2011, 19: 5811 – 5816.
- [46] GAN F, BARWICZ T, POPOVIC M A, et al. Maximizing the thermo – optic tuning range of silicon photonic structures[C] // Proceeding of IEEE Conference on Photonics in Switching, San Francisco, CA, 2007: 67 – 68.
- [47] JI Ruiqiang, YANG Lin, ZHANG Lei, et al. Five – port optical router for photonic networks – on – chip[J]. Opt Express, 2011, 19: 20258 – 20268.
- [48] WATTS M R, TROTTER D C, YOUNG R W, et al. Ultralow power silicon microdisk modulators and switches[C] // Proc International Conference on Group IV Photonics (GFP), WA2, 2008: 4 – 6.
- [49] JORIS V C, GREEN William M, ASSEFA Solomon, et al. Low – power, 2×2 silicon electro – optic switch with 110 – nm bandwidth for broadband reconfigurable optical networks[J]. Opt Express, 2009, 17: 24020 – 24029.

Silicon – Based on – Chip Optical Interconnect

LIU Liu*, ZHOU Xi

(Centre for Optical and Electromagnetic Research, School of Information and Optoelectronic Science and Engineering,
South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The recent advances on on – chip optical interconnect technologies based on the silicon platform are reviewed. Some critical components for on – chip optical interconnect system employing wavelength division multiplexing, such as waveguides, (de)multiplexers, lasers, detectors, modulator, and switches, are introduced. Their working principles and performances are discussed and compared.

Key words: silicon photonics; optical interconnect; heterogeneous integration; low temperature bonding

【责任编辑 庄晓琼】