

综述

硅基光子集成研究进展*

周培基 李智勇 俞育德† 余金中

(中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

(2013年11月29日收到; 2014年1月8日收到修改稿)

报道了国际上关于硅基光子集成的最新研究进展和本课题组在该领域的研究成果, 包括对一些光收发模块、III-V族/硅基激光器等集成器件的结构改进和工艺的探索, 展示了兼容互补金属氧化物半导体工艺的硅基光子集成在信息技术领域中的巨大前景. 可以预见, 硅基光子集成已成为硅光子学的主要研究内容, 硅光子学及硅基光子集成的发展目标是趋向更高速率、更低功耗及更大集成密度.

关键词: 硅光子学, 光子集成, 光子集成回路, 光电子集成

PACS: 42.82.-m, 42.82.Et, 42.79.Sz, 42.79.Hp

DOI: 10.7498/aps.63.104218

1 引言

在过去的半个多世纪里, 电互连在信息行业的发展起着至关重要的作用, 但随着晶体管特征尺寸的不断减小, 使电互连面临着信号延迟大、传输带宽小、功耗大、信号串扰大、加工困难、成本高等局限, 集成度提高的速度减慢甚至趋于停滞. 为此人们将目光投向具有大带宽、低延迟、低功耗、干扰小等内在属性的光互连. 虽然早在20世纪70年代中期, 作为长距离光通信代表的光纤通信已取得了巨大成功并完全取代电缆, 但在短距离通信(如板卡间、芯片间和芯片内)却仍然以电互连为主, 主要原因是支撑电互连的互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺发展已经相当成熟并拥有巨大的优势. 相比之下, 光互连作为一项较新的技术, 其探索难免暂时会有成本偏高等短期困难, 但其技术和性能仍有巨大潜力, 正是大力开展研究的时期.

2 硅光子学

半个多世纪前, 硅使微电子的发展取得了巨大的成功, 化合物半导体也紧随其后推动着光通信的发展. 随着这两个行业的迅猛发展, 它们已经逐渐融合并形成了以光电集成为代表的交叉领域. 但化合物半导体与CMOS工艺间的巨大不兼容性却并未消除, 为此硅光子学便应运而生.

硅光子学以硅为主体材料, 在其上研究并设计制作各类光学元器件, 使其实现光的发射、传输、接收等功能, 并最终实现全硅的光电集成. 相比于传统的化合物半导体, 硅在光通信或光互连中具有如下优势: 硅与传统的CMOS工艺兼容性很好, 利于集成; 其在地壳中含量高, 减缓了人们对资源的需求压力, 也意味着成本低廉; 硅对通信波段透明, 意味着光学损耗低; 硅折射率大, 具有优秀的波导性能; 硅片尺寸大, 机械性能好, 易加工. 特别是绝缘体上硅(SOI)具有高折射率差、结构紧凑、与CMOS工艺兼容、易于光电集成等诸多优点而受到广泛的关注.

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB301701)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2012AA012202)和国家自然科学基金(批准号: 61275065)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yudeyu@semi.ac.cn

3 硅基光子集成

近年来,硅基光子器件得到了迅猛的发展,如光栅耦合器^[1-3]、光开关^[4]、光延迟线^[5]、微环滤波器^[6]、调制器^[7]等,目前对于这些单元器件的分析、设计和制作已经相当成熟.但要实现最终的大规模光电集成,构建全光通信系统或者全光互连网络,我们必须先将这些光子器件组成一个具有某一功能的系统并实现以光子器件集成为主的硅基光子集成.

硅基光子集成按材料和制造工艺可分为单片集成和混合集成两类.单片集成是目前比较常见的一类硅基光子集成,指在同一硅晶圆上利用半导体制造工艺技术,使多个相同或不同功能的硅基光子器件在整体上构成阵列化、模块化的单个芯片,以此实现基于硅光子单元的一种或多种光学信息处理功能,即同一芯片上光子器件的平面集成.混合集成主要所要实现的功能目标与单片硅基光子集成基本相似,但所用材料通常为多个孤立的半导体衬底,且往往包含不同体系的材料,如III-V族半导体材料、铁电体材料、有机聚合物、液晶等,将这些具有不同功能不同材料的芯片用焊接或键合技术在物理上组成一个整体而实现一个完整的功能^[8].

3.1 单片集成

单片硅基光子集成作为硅光集成的基础,在较早之前就引起了人们的重视并开始研究.2008年美国Luxtera公司^[9]研制出世界上首个硅基单片集成的 4×10 Gbit/s波分复用(WDM)光收发器,拉开了各大研究机构及公司对硅基单片集成研究的序幕.

2012年GFP会议上,Kotura公司^[10]推出了 4×25 Gbit/s的硅基光收发模块,该收发模块集成了锗-硅调制器和锗光探测器,可在SOI平台上四路并行传输,其性能良好,在25 Gbit/s速率,2.5 Vpp驱动偏压条件下可达到5.2 dB的消光比.

与此同时IBM公司^[11]宣布全球首个亚100 nm的CMOS集成纳米光子技术,将硅纳米光子元器件(如WDM滤波器、锗探测器、硅调制器,光开关等)与模拟混合信号电路单片集成在一起.2013年在OFC会议上,IBM公司^[12]报道了其利用新建立的首个90 nm CMOS集成硅

纳米光子技术制造了单片集成锗接收机.该接收机在10 Gbit/s和25 Gbit/s下的灵敏度分别是-13.3 dBm和-5.6 dBm,并且在商业级温度应用范围内灵敏度代价不超过1 dB,即便温度升至95 °也不会超过2 dB,其光通信链路在10 Gbit/s至28 Gbit/s是可用的.

2013年NTT公司^[13]报道其开发出一个22 Gbit/s \times 16信道的WDM接收机,实现了SiO_x的阵列波导光栅(AWG)和锗探测器(PD)的单片集成,如图1所示.其光纤到PD的响应度为0.29 A/W,通道间串扰为-16 dB,并在所有16路通道上成功地接收了22 Gbit/s的信号.此外,他们还用该器件实现了12.5 Gbit/s的信号光长达40 km的远距离传输,在误码率 10^{-19} 下其灵敏度为-6.8 dBm.

Alcatel-Lucent公司^[14]报道了一个单片集成相干调制器和接收器的硅光子芯片,其可以调制和检测高达224 Gbit/s的偏振复用16-正交幅度调制的光信号. Delaware 大学等研究机构提出了OPSiS-IME硅光子平台,并在该平台上集成了一些无源器件(如低损耗光栅耦合器和波导)和有源器件(包括58 GHz顶层锗增益光电探测器,45 GHz高可调性硅微环调制器和30 GHz行波马赫-曾德尔调制器).调制器和光电探测器的高带宽使得平台可以支持50 Gbit/s甚至更高的数据速率^[15].

在单片集成工艺上比较值得一提的是硅上长锗工艺.单片集成里通常会用到硅上锗材料,比如硅响应波长较短,不到1.1 μ m,因此对于探测1550 nm等波段一般要用到锗探测器^[16-20].同时锗晶体管对于今后的硅基光电集成也是十分有益的.此外也有人提出利用硅基上锗应变来改变锗的带隙结构,使其成为直接带隙材料而能够发光^[21-23].可见不论是在现在的探测器,还是今后的硅基光电集成或IV族材料发光上,硅基上生长锗都是一个重要课题.但由于它们之间存在4%的晶格失配,锗生长过程中会在晶格内产生缺陷而形成非辐射复合中心,进而降低器件性能.于是有人用低温下两步生长锗的方法来生长锗,其中低温锗作为缓冲层以减少缺陷^[24].在2013年GFP会议上,有很多研究机构报道了其利用相关的硅基上锗外延工艺制作了硅上锗器件,如NTT公司^[17]生长锗探测器的方法是先用超高真空空气相沉积,然后900 °C下退火而成,其结构示意图如图2所示.

3.2 混合集成

随着硅基光子集成的逐步发展以及人们对硅基光子集成的需求不断提升, 单纯的单片硅基光子集成已经不能够满足人们的需求. 与此同时, 混合硅基光子集成以其实现途径简便灵活及器件间的

制作相互独立的优点而在硅基光子集成中占据一席之地. 同时它也极大地拓宽了硅基光子集成的发展空间, 使硅基光子集成系统在技术进步方面获得了新动力. 特别是在硅基发射模块中, 由于间接带隙的硅难以发光, 因此在发光模块中通常会与 III-V 族或其他材料混合集成.

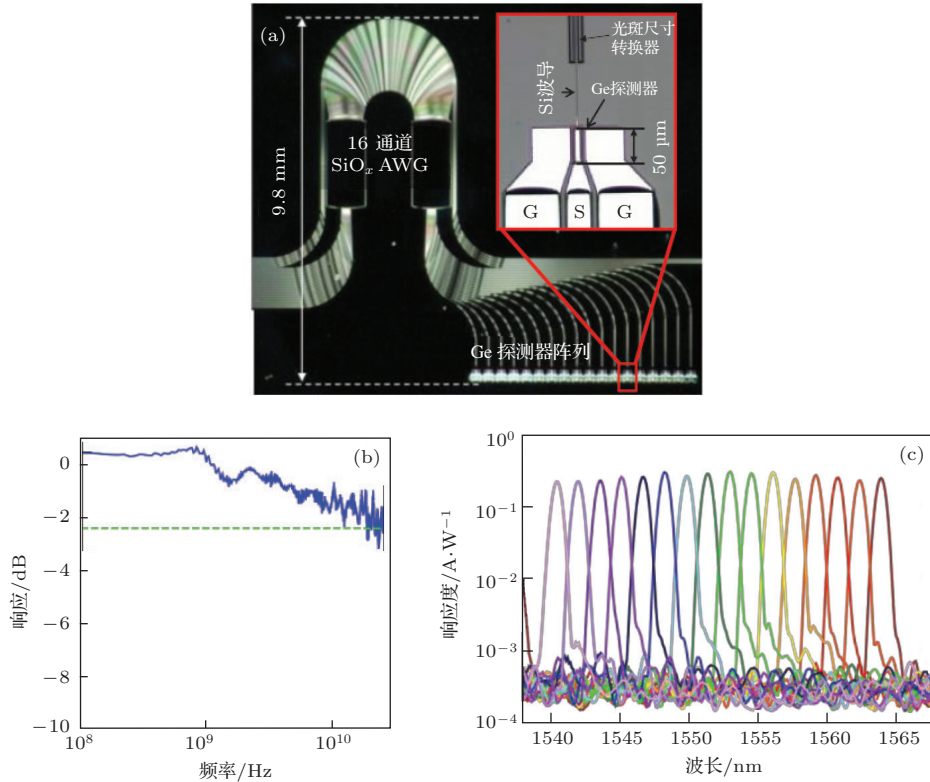


图1 (a) AWG 顶视图; (b) 锗探测器频响特性; (c) AWG-PD 的响应光谱

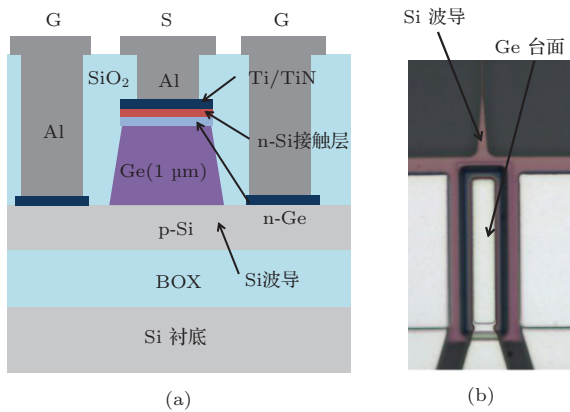


图2 (a) 锗探测器横截面图; (b) 锗探测器概观

2007年, 比利时根特大学的 Campenhout 等^[25]利用SOI上键合InP的方法研究了基于硅平台的超紧凑异质集成InP微盘激光器, 其阈值电流为0.6 mA, 最大单向连续波输出功率为7 μW. 2013年, 该研究小组的 Spuesens 等^[26]又提出将一

种可控键合的方法和自对准工艺用于基于硅上光互连的 III-V 族材料, 并证实了用该方法实现的微盘激光器无论在阈值电流还是斜率效率上都达到了令人满意的程度. 在这个新方法中, 除了检测台的刻蚀外, 激光器和探测器的所有加工步骤都是同时进行的. 2013年上海微系统信息技术研究所的 Wang 等^[27]也就此方案的散热部分提出了优化结构设计. 他们在微盘中引入导热性良好的多晶硅, 使有源层直接与高导热性的多晶硅接触, 仿真结果显示热阻降低了64%, 连续波输出功率提高了5.7倍, 这将会大幅提高混合微盘激光器的激光性能.

2010年, Intel 公司^[28]报道了一种世界上首次集成了硅基混合光源的50 Gbit/s 硅基光子链路, 用4路波分复用实现了4 × 12.5 Gbit/s 的传输速率. 2011年, Kurczveil^[29]研制出世界上首个混合 III-V/Si 的 AWG 激光器, 其信道间隔为360 GHz,

阈值电流范围从113—147 mA, 光纤的输出功率为-23 dBm到-14.5 dBm.

2013年OFC会议和GFP会议上, 也有关于硅基光电集成方面的进展报道. 法国阿尔卡特朗讯贝尔实验室的Liepvre等^[30]利用键合技术制作了硅上III-V的AWG激光器, 5个信道的波长间隔为392 GHz, 阈值电流约40 mA, 最大输出功率约为3 dBm, 其原理图和制作图如图3所示.

硅基混合集成除了用在发光模块之外, 在接收模块中也可应用. TeraXion公司和McGill大学^[31]报道了超小型基于硅混合集成的相干接收机, 其中的接收模块是直接用电成的光电二极管阵列通过倒装焊键合到芯片上. 用单信道和WDM传输测试证实其实现了偏振复用正交相移键控调制下28 Gbaud的4800 km传输. 其核心部件非常紧凑, 仅6 mm × 8 mm.

4 光电集成

硅基光子集成之后的下一步目标是硅基光电集成, 不仅将光子器件集成在一个模块上, 还要包括电子器件. 相比于光子集成, 光电集成要求更高. 目前光电集成多用于集成有源光子器件和其外部驱动电路.

2013年Luxtera公司^[32]提出用硅光子学实现光互连应用中的光电一体化集成. 他们将芯片分为光子芯片和电子芯片, 用微小铜柱将两个芯片倒装焊粘连到一起, 如图4所示. 这里MZI为马赫-曾德尔干涉仪. 以铜柱作为光学器件与电学驱动器件之间的连接元件可以充分减小电容的寄生效应. 这样做不仅保持了光子芯片和电子芯片各自的优势, 也保证了其应有的可扩展性以应对未来的数据速率和功耗要求.

2013年日本PECST研究所的Urino等^[33]将阵列激光二极管(LD)、光分束器、硅光调制器、锗探

测器和硅光波导集成在单一的硅衬底上做成光学插板, 如图5所示, 并用其实现了12.5 Gbit/s的无差错数据传输和6.6 Tbit/s·m²透射密度. 其中大规模集成电路(LSI)芯片用倒装焊技术安装在插板上, 并与调制器和探测器电学相连, 整个系统不存在光信号从外界输入和输出的问题.

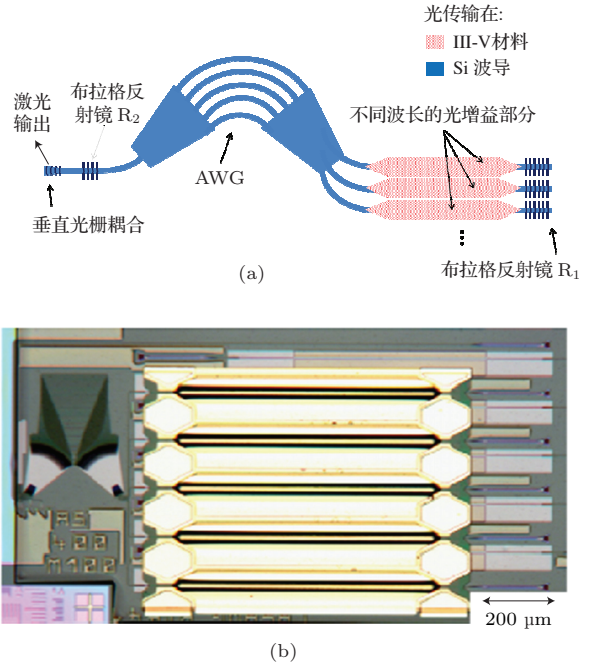


图3 (a) AWG激光器的原理图; (b) AWG激光器的制作图

此外, Rakowski等^[34]报道了倒装芯片封装的CMOS基于环的光子发射器, 将硅环调制器、硅光子发射器集成在一个芯片内, 而差分驱动电路倒装焊在光子芯片上, 其功耗低至340 fJ/bit, 并且在10 Gbit/s时仍能获得清晰的眼图.

5 本课题组研究进展

在光子集成方面, 近年来本课题组也做了大量研究. 比如在单片集成上, 2012年提出了一个基于

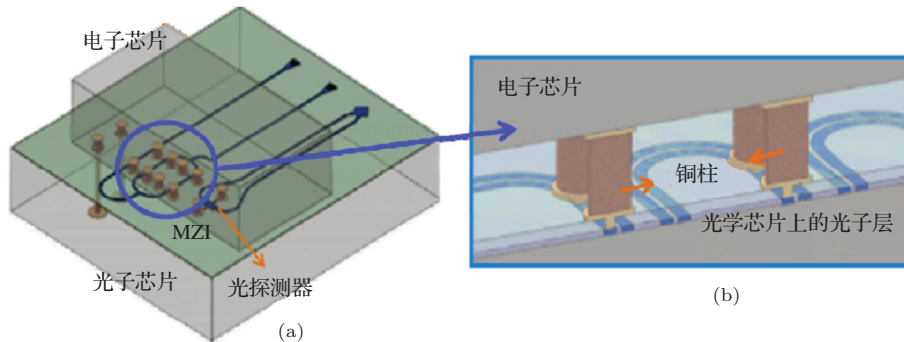


图4 (a) 电学驱动集成电路芯片通过铜柱倒装焊键合到光子芯片的示意图; (b) 两芯片通过铜柱键合的横截面示意图

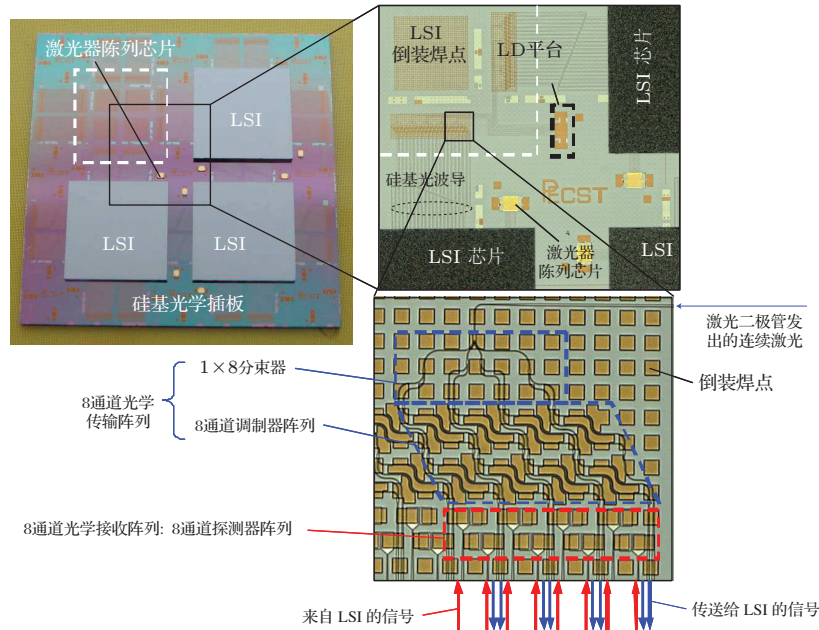


图5 用于片间互连的光电系统的概念模型

微环调制的WDM调制器^[35], 并且已经在实验上实现了 4×50 Gbit/s的调制, 这也表明了其在片上光互连中实现Tbit/s传输速率的巨大潜力.

此前提出并设计制作了交趾型结构的反向pn结调制器来提高调制效率^[36-39]. 为了优化该调制器性能, 将交趾型结构改为锯齿型, 减小其电容, 从而改善其频响特性, 使得调制器电学带宽高达51 GHz. 为实现WDM功能, 将4个微环调制器集成在一起, 总面积仅为 0.5 mm^2 , 其结构示意图如图6(a)所示.

实验测得的光传输谱和眼图如图6(b)所示, 信道间隔符合设计值(1.4 nm), 同时得到了消光比在5.3—6.1 dB之间情况下的清晰眼图. 当驱动电压减小到3 V, 调制速度为50 Gbit/s时, 得到的消光比为4 dB, 功耗为90 fJ/bit. 总功耗在100 Gbit/s下小于30 mW.

对于混合集成, 本课题组也做了很多相关工作. 我们提出了一种在SOI衬底上混合集成III-V族有源器件的硅基光互连接收模块的设计方法^[40], 将商用InGaAs光电探测器通过倒装焊工艺键合在SOI芯片上, 并利用光栅耦合器将光从波导耦合进光电探测器, 测试结果显示其得到了4 dB的耦合损耗和1 Gbit/s的数据传输速率. 其三维设计原理图和横截面图如图7所示, 光纤与垂直轴线固定成 10° 夹角, 这样具有最高的耦合效率.

分别对直接封装的探测器和最终接收模块芯片进行静态和动态测试. 对光响应度的测试显示接

收模块芯片的响应度明显低于直接封装探测器的结果, 通过对比可以计算出光栅耦合器到探测器间的耦合损耗约为4 dB. 损耗大的原因是两者存在较大折射率差, 反射损耗大, 同时倒装焊点对光信号有吸收作用, 通过在两者间加入折射率匹配层以及优化电极结构和位置可以改善耦合损耗问题.

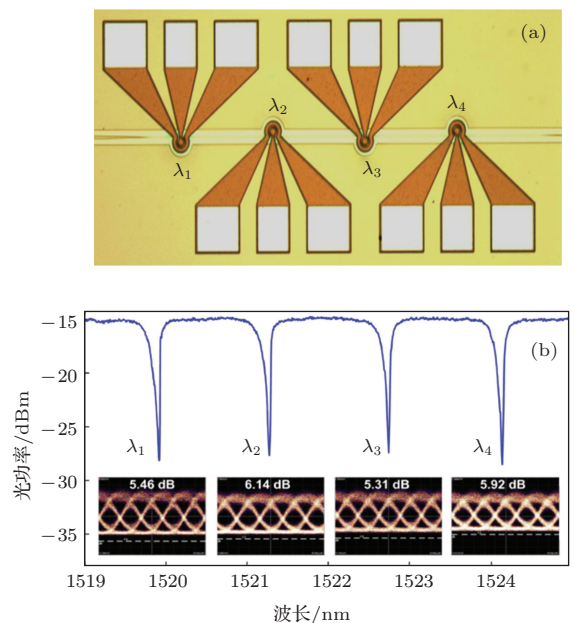


图6 (a) WDM调制器示意图; (b) 实验测得的光传输谱, 内插图为50 Gbit/s下测得的眼图

对于频响特性的测试显示直接封装探测器的3 dB带宽约为1.5 GHz, 而接收模块芯片的带宽约为1 GHz, 可见其主要是受限于探测器自身的带

宽,同时引线键合和倒装焊工艺也对其性能产生了影响.

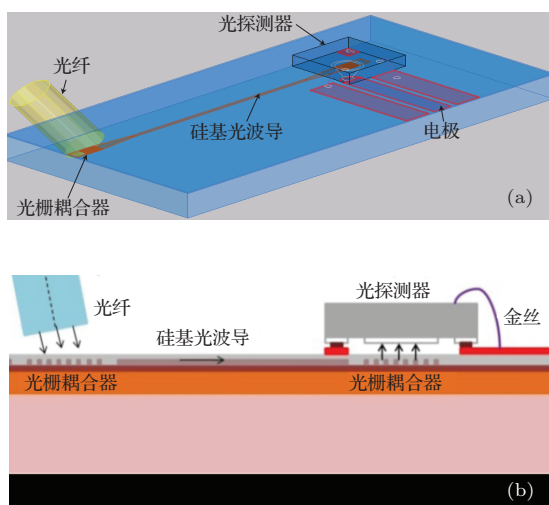


图7 (a) 硅基光互连接收模块的三维原理图; (b) 硅基光互连接收模块横截面图

6 结 论

近年来,在光通信和光互连日益发展的大环境下,多家研究机构和公司都在硅基光子集成上以追求其更高性能做了大量研究工作.可以看到,硅基光子集成已经是光通信和光互连领域中发展的大趋势,并且现在对光子集成有如下要求:同光纤通信类似,光互连的波长由光波导波长来优选.因此光波导的材料、结构和特性将在光互连应用中处于决定性的位置.显然,1.55 μm 和1.3 μm 波段具有许多优势;目前电互连中电子器件的速率为10 Gbit/s,下一步对器件的需求是100 Gbit/s的超高速率.光互连的超高速率目标为2015年和2022年总的I/O速率将分别达到82 Tbit/s和230 Tbit/s;为实现低功耗,要求片外总能量为50—170 fJ/bit,器件能耗为10—30 fJ/bit,片上总能耗为10—30 fJ/bit,器件能量为2—6 fJ/bit.这些指标比当前的器件功耗水平低3—5个数量级;硅光子学中成熟的CMOS工艺提供了极好的技术基础,因此应用CMOS工艺制造光子集成电路是最佳的选择和必由之路.基于这些要求,下一步硅基光子的发展趋势将是更高速率、更低功耗以及更集成化.作为集成工作的基础研究,目前人们对于硅基光子集成方面的研究工作仍然比较多.下一步研究工作将不仅局限于硅基单片集成,而要逐渐扩展到硅基混合集成和硅基光电集成,并且日后硅基光电集成将作为硅基光子学发展的更高目标.

参考文献

- [1] Zhu Y, Xu X J, Li Z Y, Zhou L, Han W H, Fan Z C, Yu Y D, Yu J Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 014229
- [2] Zhou L, Li Z Y, Zhu Y, Li Y T, Fan Z C, Han W H, Yu Y D, Yu J Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 124214
- [3] Zhou L, Li Z Y, Hu Y T, Xiong K, Fan Z C, Han W H, Yu Y D, Yu J Z 2011 *Chin. Phys. B* **20** 074212
- [4] Xu H H, Huang Q Z, Li Y T, Yu Y D, Yu J Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 084210
- [5] Hu Y T, Xiao X, Li Z Y, Li Y T, Fan Z C, Han W H, Yu Y D, Yu J Z 2011 *Chin. Phys. B* **20** 074208
- [6] Xiong K, Xiao X, Hu Y T, Li Z Y, Chu T, Yu Y D, Yu J Z 2012 *Chin. Phys. B* **21** 074203
- [7] Xu H, Li X Y, Xiao X, Li Z Y, Yu Y D, Yu J Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 114212
- [8] Yu J Z 2011 *Silicon Photonics* (Beijing: Science Press) p404 (in Chinese) [余金中 2011 硅光子学 (北京: 科学出版社) 第404页]
- [9] Pinguet T, Analui B, Balmater E, Guckenberger D, Harrison M, Koumans R, Kucharski D, Liang Y, Masini G, Mekis A, Mirsaidi S, Narasimha A, Peterson M, Rines D, Sadagopan V, Sahni S, Sleboda T J, Song D, Wang Y, Welch B, Witzens J, Yao J, Abdalla S, Gloeckner S, Dobbelaere P D 2008 *Group IV Photonics Conference* Cardiff, UK, September 17–19, 2008 p362
- [10] Jater S, Malinge Y, Zhou Z, Liang H, Liao S, Li Z, Bushyakanist C, Lee D C, Shafiiha R, Luff J, Feng D Z, Asghari M 2012 *Group IV Photonics Conference* San Diego, USA, August 29–31, 2012 p159
- [11] Assefa S, Shank S, Green W, Khater M, Kiewra E, Reinholm C, Kamlapurkar S, Rylyakov A, Schow C, Horst F, Pan H P, Topuria T, Rice P, Gill D M, Rosenberg J, Barwicz T, Yang M, Proesel J, Hofrichter J, Offrein B, Gu X X, Haensch W, Monaghan J E, Vlasov Y 2012 *International Electron Devices Meeting* San Francisco, USA, December 10–13, 2012 p33.8.1
- [12] Assefa S, Pan H, Shank S, Green W M J, Rylyakov A, Schow C, Khater M, Kamlapurkar S, Kiewra E, Reinholm C, Topuria T, Rice P, Baks C, Vlasov Y 2013 *Optical Fiber Communications Conference* Anaheim, USA, March 17–21, 2013 OM2H.4
- [13] Nishi H, Kou R, Hiraki T, Tsuchizawa T, Fukuda H, Ishikawa Y, Wada K, Yamada K 2013 *Optical Fiber Communications Conference* Anaheim, USA, March 17–21, 2013 OM2J.4
- [14] Dong P, Liu X, Chandrasekhar S, Buhl L L, Aroca R, Baeyens Y, Chen Y K 2013 *Optical Fiber Communications Conference* Anaheim, USA, March 17–21, 2013 PDP5C.6
- [15] Novack A, Liu Y, Ding R, Gould M, Jones T B, Li Q, Yang Y, Ma Y J, Zhang Y, Padmaraju K, Bergmen K, Lim A E J, Lo G Q, Hochberg M 2013 *Group IV Photonics Conference* Seoul, Korean, August 28–30, 2013 p7
- [16] Intermite G, Warburton R E, Myronov M, Allred P, Leadley D R, Gallacher K, Paul D J, Pilgrim N J, Lever

- L J M, Ikonic Z, Kelsall R W, Buller G S 2013 *Group IV Photonics Conference* Seoul, Korean, August 28–30, 2013 p132
- [17] Takeda K, Hiraki T, Tsuchizawa T, Nishi H, Kou R, Fukuda H, Ishikawa Y, Wada K, Yamada K 2013 *Group IV Photonics Conference* Seoul, Korean, August 28–30, 2013 p138
- [18] Kang J, Zhang R, Takenaka M, Takagi S 2013 *Group IV Photonics Conference* Seoul, Korean, August 28–30, 2013 p140
- [19] Cho N, Kim M, Ma Z Q 2013 *Group IV Photonics Conference* Seoul, Korean, August 28–30, 2013 p77
- [20] Kim I G, Jang K S, Kim S, Joo J, Kim G 2013 *Group IV Photonics Conference* Seoul, Korean, August 28–30, 2013 p79
- [21] Suwa Y, 2013 *Group IV Photonics Conference* Seoul, Korean, August 28–30, 2013 p37
- [22] Sukhdeo D S, Nam D, Kang J H, Petykiewicz J, Lee J H, Jung W S, Vuckovic J, Brongersma M L, Saraswat K C 2013 *Group IV Photonics Conference* Seoul, Korean, August 28–30, 2013 p73
- [23] Geiger R, Süess M J, Minamisawa R A, Bonzone C, Schiefler G, Frigeriod J, Chrastina D, Isella G, Spole-nakb R, Faist J, Sigg H 2013 *Group IV Photonics Conference* Seoul, Korean, August 28–30, 2013 p93
- [24] Colece L 1997 *Solid State Phenom.* **54** 55
- [25] Campenhout J V, Romeo P R, Regreny P, Seassal C, Thourhout D V, Cioccio L D, Fedeli J M, Baets R 2013 *National Fiber Optic Engineers Conference* Anaheim, USA, March 25, 2007 PDP35
- [26] Spuesens T, Régreny P, Thourhout D V 2013 *Group IV Photonics Conference* Seoul, Korean, August 28–30, 2013 p154
- [27] Wang Z Q, Sheng Zhen, Qiu C, Li H, Wu A M, Wang X, Zou S C, Gan F W 2013 *Group IV Photonics Conference* Seoul, Korean, August 28–30, 2013 p49
- [28] Intel Corporation http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/intel-research/Intel_SiliconPhotonics50gLink_FINAL.pdf[2010-07]
- [29] Kurczveil G 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* **17** 1521
- [30] Liepvre A L, Jany C, Accard A, Lamponi M, Make D, Lelarge F, Fedeli J M, Messaoudene S, Bordel D, Duan G H 2013 *Group IV Photonics Conference* Seoul, Korean, August 28–30, 2013 p150
- [31] Painchaud Y, Pelletier M, Poulin M, Pelletier F, Latrasse C, Robidoux G, Savard S, Gagné J F, Trudel V, Picard M J, Poulin P, Sirois P, D'Amours F, Asselin D, Paquet S, Paquet C, Cyr M, Guy M, Osman M M, Zhuge Q, Xu X, Chagnon M, Plant D V 2013 *Optical Fiber Communications Conference* Anaheim, USA, March 17–21, 2013 OM2J.2
- [32] Sahni S, Ayazi A, Chi Y M, Dahl A, Dobbelaere P D, Gloeckner S, Hon K Y, Hovey S, Liang Y, Mack M, Masini G, Mekis A, Peterson M, Pinguet T, Schramm J, Sharp M, Sun P, Timpe R, Verslegers L 2013 *Group IV Photonics Conference* Seoul, Korean, August 28–30, 2013 p81
- [33] Urino Y, Horikawa T, Nakamura T, Arakawa Y 2013 *Optical Fiber Communications Conference* Anaheim, USA, March 17–21, 2013 OM2J.6
- [34] Rakowski M, Pantouvaki M, Yu H, Bogaerts W, Meyer K D, Steyaert M, Snyder B, O'Brien P, Ryckaert J, Absil P, Campenhout J V 2013 *Optical Fiber Communications Conference* Anaheim, USA, March 17–21, 2013 OM2H.5
- [35] Xiao X, Xu H, Li X Y, Li Z Y, Chu T, Yu J Z, Yu Y D 2013 *Optical Fiber Communications Conference* Anaheim, USA, March 17–21, 2013 OW4J.3
- [36] Li Z Y, Xu D X, McKinnon W R, Janz S, Schmid J H, Cheben P, Yu J Z 2009 *Opt. Express* **17** 15947
- [37] Xiao X, Xu H, Li X Y, Hu Y T, Xiong K, Li Z Y, Chu T, Yu Y D, Yu J Z 2012 *Opt. Express* **20** 02507
- [38] Xu H, Xiao X, Li X Y, Hu Y T, Li Z Y, Chu T, Yu Y D, Yu J Z 2012 *Opt. Express* **20** 15093
- [39] Hu Y T, Xiao X, Xu H, Li X Y, Xiong K, Li Z Y, Chu T, Yu Y D, Yu J Z 2012 *Opt. Express* **20** 15079
- [40] Xu H H, Hu Y T, Zhu Y, Li Y T, Li Z Y, Fan Z C, Yu Y D, Yu J Z 2010 *Group IV Photonics Conference* Beijing, China, September 1–3, 2010 p1.21

REVIEW

Research progress of silicon-based photonic integration*

Zhou Pei-Ji Li Zhi-Yong Yu Yu-De[†] Yu Jin-Zhong

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100083, China)

(Received 29 November 2013; revised manuscript received 8 January 2014)

Abstract

The research progress of the silicon-based photonic integration in the world and the results of our group in recent years are reported in this paper, including exploration of design and improvement on process of the optical transceiver modules, III-V/silicon lasers and other integrated photonics. The silicon photonics is predicted to have a great prospect in many fields due to its good compatibility with complementary metal oxide semiconductor technology. It is concluded that the trend of photonic integration on silicon substrate is toward high data rate, low power consumption and large integration density, and the silicon based photonic integration will become a main research subject of silicon photonics in the future.

Keywords: silicon photonics, integrated photonics, photonic integrated circuits, optoelectronic integration

PACS: 42.82.-m, 42.82.Et, 42.79.Sz, 42.79.Hp

DOI: [10.7498/aps.63.104218](https://doi.org/10.7498/aps.63.104218)

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2011CB301701), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2012AA012202), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61275065).

[†] Corresponding author. E-mail: yudeyu@semi.ac.cn