

本期专家论坛 栏目策划人



李尔平

浙江大学信息学部副主任、浙江大学-伊利诺伊大学联合学院院长、教育部“长江学者”讲座教授、IEEE Fellow、首批国家千人计划特聘教授;研究领域为新型微纳光电子器件集成技术、微波电子射频天线及电磁兼容等;荣获多个国际奖项和荣誉,包括2015年荣获国际 IEEE 最高奖之一——理查德-司徒达特奖;已发表国际论文400余篇,英文专著2部,申报多项美国、新加坡和中国专利。

硅基光子技术发展的 特点、机遇与挑战

Features, Opportunities and Challenges of Silicon Photonics

杨建义/YANG Jianyi
王根成/WANG Gencheng

(浙江大学, 浙江 杭州 310027)
(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0047-005

摘要: 通信容量的爆炸式增长促进了光子技术的发展,认为以硅材料为基底的硅基光子器件与集成技术具有低功耗、高速率、结构紧凑等突出优势,将成为解决信息网络所面临的功耗、速率、体积等方面瓶颈的关键技术。通过与微电子行业的发展进行对比,分析了硅基光子发展的特点及关键技术挑战,并给出了对其未来发展机遇的思考。

关键词: 硅基光子; 光子集成; 光电混合集成; 光通信

Abstract: The explosive growth in telecommunication capacity promotes the development of silicon photonics. To break the bottlenecks (power consumption, bandwidth and volume) of current information networks, several outstanding advantages of silicon photonics including low power consumption, high speed and very compact size are introduced in this paper. Comparing with the development of the microelectronics industry, the features and the major challenges of silicon photonics are analyzed, and the opportunities in the future are also pointed out.

Key words: silicon photonics; integrated optics; optical communication; opto-electronic hybrid integration

硅基光子的研究可以追溯到20世纪80年代^[1],受限于当时的硅基制作工艺,硅基光子的发展十分缓慢。最近10多年来,该领域呈现出爆炸式增长,并被视为一个颠覆性的平台技术。人们期待着硅基光子在诸多应用领域发挥出革命性作用,目

前首先聚焦在了数据中心、高性能计算和传感等领域。

微电子的发展得益于微电子工艺和集成电路设计的发展,其中的一个关键是设计与制造的分离。研究人员利用多项目晶圆(MPW)服务,可以很快地通过大规模集成电路实现前沿开创性工作,这有利地推动了微电子技术和应用。培养年轻的学生工程师使用MPW制作工具

收稿日期: 2017-07-28
网络出版日期: 2017-09-08

和工艺,让他们自己去设计前沿电路,并将其投入到无厂制作,这是许多微电子公司取得成功的原因^[2]。

当前,硅基光子就像20世纪70年代的微电子技术,正处于前期扩张阶段,但是硅基光子芯片在制作方面存在一个巨大的优势:大规模生产且高度可控微电子芯片的硅代工厂已经存在。在微电子行业中已经存在硅基光子所需要的微细加工设备,如:Luxtera公司生产的硅基光子芯片已经运用到了一些高性能的计算机群中^[3]。

硅基光子正处于重要的转变时期,全世界的学术圈和工业圈可以通过诸多代工厂提供的MPW服务使用有源和无源硅基光子工艺。并且从现阶段的发展状况来看,除了硅基光源集成略困难外,基于硅晶圆可以实现几乎所有具有合理竞争水平的关键光功能器件。

1 利用CMOS工艺线,硅基光子也将是一个无厂化产业

集成光子技术从提出至今已近50年,与微电子与集成电路不同,一直以来集成光子技术主要还是针对特定的运用,需要采用不同的光电材料和精细化的工艺。由于主要应用于光纤通信,集成光子器件实际可以说还处于分立元器件状态——可能称为光电器件更准确,每个器件被单独的封装,然后通过光纤连接起来。通常可以看到一个通信系统使用的光电器件由多种不同的材料系统组成,如:用于实现光学复用和无源器件的玻璃基上扩散波导、用于实现调制器的铌酸锂材料、用于实现激光器的磷化铟材料、用于实现光探测器的锗材料等。每一个光电器件制作的工艺与其他器件的制作工艺无法兼容。每一种光电材料的选取都依赖于器件的性能要求。这些光电器件都需要特定的制作设备,与微电子互

补金属氧化物半导体(CMOS)相比,这些光电器件还远远无法进行大批量生产(当然需求量也根本没有达到),制作成本相当高。硅基光子技术潜力巨大,首先便在于其可以将多功能光子器件集成在单个芯片上,并通过先进的CMOS工艺进行大批量生产。这使得高度复杂的光子集成系统通过较合理的成本生产出来成为可能。

归功于成熟的CMOS工艺,在原有的微电子工艺基础上加以改动,便可以制造硅基光子器件与系统。基于CMOS工艺已制造出能够实现光的产生、探测、调制和其他操控功能的硅基光子芯片。此外,人们也结合光学和电学的优势,在硅材料上同时制造光子器件和集成电路,实现片上混合集成系统。

近年来,硅基光子的相关研究人员沿用与常规CMOS晶体管制作完全相同的设备,开发了相应的工艺流程,制作了复杂的光子集成系统。在这些设施下进行光子集成芯片的设计,限制是十分明显的:那些被证实与CMOS工艺不兼容的材料被严格禁止进入生产线,硅基相关的工艺和系统的设计必须在不破坏CMOS工艺的情况下进行。但是,如果投入到当今CMOS工艺的数十亿美元的投资能够直接利用到片上硅基光学系统的建立中,那么硅基光子将会迅速地投入商业化,实现大规模生产^[4]。当然,人们也在尝试采用一些补充方案,最直接的便是加入额外工艺流程,如:III-V族晶片的键合、金薄膜的制备、功能性聚合物材料的加入等。

和微电子行业一样,硅基光子制作工艺平台可以提供以下优势:

(1)资源效率利用高。避免超净间和高昂的工艺研发成本。

(2)设计可重复利用。微电子行业的发展得益于可重复使用的知识产权(IP)模块。同样的,硅基光子也可使用相同的概念允许研发人员研发出元器件库。这必将促进系统级

别的研究和开发。

(3)资源可获取。将硅基光子制作工艺和器件库开放给全世界硅基光子设计研发人员,确保资源的共享,实现资源的高效利用。

(4)可商业化。可以促使硅光行业使用研发人员设计的元器件和系统,在此基础上设计出可通过一般代工厂生产的新产品。

(5)鼓励协同设计。由共同的设计目标、语言和制作工艺促成。

目前国际上已有以比利时微电子研究中心(IMEC)和新加坡微电子研究(IME)为代表的硅基光子代工企业提供硅基光子的代工服务,他们也已经开始提供包括基本器件在内的工艺设计包(PDK)工具。在中国,中芯国际和宏力半导体曾经零散地为研究工作提供过一些硅基光子芯片的制备服务,但由于代工量等因素,既没有形成常态化的服务内容,也没有形成PDK工具。这两年,硅基光子吸引了大量研发机构的重视,从目前来看,中科院微电子所、中科院上海微系统所等都在尝试建立面向硅基光子的代工平台,其中中科院微电子所已经初步可以提供服务,其中包括PDK工具的建立;上海交通大学、华中科技大学、浙江大学等也在尝试建立基于大学微纳加工平台的硅基光子制备服务,虽然会在一些工艺上受限,但在特征尺度(由于采用电束子曝光)、加工时间等方面都还是有一定优势的。这些工艺平台建设必将加速中国硅基光子的发展和应用水平的提升。

2 只有通过巨大的应用驱动,硅基光子才可能成为颠覆性技术

电子与光子的区别在于:电子是费米子,而光子属于波色子。两个电子在同一时刻不可能处于同一位置,两者之间的相互作用强。利用电子的这一特性可以设计出大量的非线性

性开关器件——晶体管,也就是说电子十分适合于实现计算功能。与此相反,光子可以在同一时刻处于同一位置,一般情况下,光子之间是相互独立的,这也是为何通过单个光纤可以实现每秒钟太比特量级数据传输的原因。十分吸引人的一点是:可以设计一种芯片,计算部分通过电子实现,传输部分通过光学实现。结合各种复用技术(诸如成熟的波分复用(WDM)技术),每个通道传输一组数据,而每一个通道上电学数据传输并不需要很高(低于几十吉比特每秒),建立的光学系统便可以通过单个光纤每秒钟传输太比特量级数据,这便是最初推动硅基光子技术迅速发展的片上互连技术的设想。从目前看来,这种片上互连短时间内还是难以形成真正需求的。虽然在互连所需要的收发、传输、系统架构方面都取得了较大的进展,但真正意义上可以取代现有电互连的优势还没有显现出来。

硅基光子的发展依赖于应用需求的大小。随着硅基光学制作工艺的开发,人们也提出了更多的应用,其中最直接的还是在长距离和中短距离的数据通信方面^[9]。长距离光纤通信成功发展,已经成为当代通信的主要支柱之一。当前光纤通信正从长距离逐渐向短距离(数据中心之间)发展,数据通信市场的大趋势是通信距离越来越短,每一部分的价格在急剧下降,而通信容量在显著提高。硅基光子商业化的方向也集中在了大容量、短距离的应用上,诸如数据中心和高性能计算。未来这些应用会延伸到板间短距离的连接,更远期的才会是面向中央处理器(CPU)核之间的片上互连通信^[9]。

人们也在利用硅基光子探索制备信息处理芯片的可能。基于传统概念下的光逻辑功能与光信息处理架构的设计是一种主要思路,但这种简单地将电域信息处理器的设计思路用于光域设计是否可行并具有优

势还有待证明。最近,基于神经网络的深度学习是热点,有人已经着手采用硅基光子芯片,构建基于光路的神经网络。其中,深度学习的实现需要依赖于对硅基光子光路网络的灵活操控,这可能会展现出光网络的一些优势。

除了数据通信与信息处理,最具有前景的硅基光子芯片运用应该是传感,包括:生物传感^[9]、成像^[7]、信号处理^[8]、光探测与测距(LIDAR)^[9]等。利用硅基光子芯片实现多通道传感可以发挥性能和成本上的优势,如果能够借助于二维材料或者其他功能材料,充分利用二维材料等优质的表面特性,会对硅基光子传感芯片性能的提升带来更大优势。物联网发展对传感芯片的需求巨大,呈现出极为细分与个性化的特点,对硅基光子的设计技术提出了要求。LIDAR的应用可能是最具通用性的需要。如果将现有的基于旋转扫描的LIDAR和基于微机电系统(MEMS)转动扫描的LIDAR分别视为第1代和第2代LIDAR,则基于硅基光相控阵芯片的相位扫描LIDAR可以视为第3代。由于LIDAR的实质是多光束合成机制,可以实现智能化波束成形,因此无论是在市场还是技术方面都会让人产生非常大的想像空间。当然这其中也需要许多支撑技术,包括:系统构建与探测技术、光路系统、片上监测等。

量子信息处理系统的未来应用必须依赖于可集成量子系统的构建,硅基光子芯片也会发挥作用。这其中的应用可能有量子计算和量子测量,所基于的是片上光量子信息传输与处理,但仍需要解决量子光源和单光子探测的可集成技术,特别是针对1 550 nm波段。当然,硅基氮化硅材料由于非线性特性更优,在量子集成芯片应用方面会是更优的选择,也可以避开1 550 nm波段的使用。当然,量子信息系统的真正应用还有较长的路要走。

虽然目前硅基光子还没达到值得CMOS行业关注的规模,但是人们普遍认为硅基光子已经开始成为一个重要的产业。很多著名的半导体企业和信息技术企业投入大量的人力和财力推进硅基光子的产业化,如Intel、IBM、Oracle、中兴通讯等。众多新成立的公司也在积极研发硅光产品,如Luxtera等。商用化的光电子集成芯片已经投入到市场中。保守估计到2020年,硅光产业的年产值将达到10亿美元。

3 硅基光子的应用需要自身基础性技术,也需要支撑技术

3.1 单元功能器件技术

单元功能器件技术是硅基光子的基础性技术之一。迄今为止,单元功能器件的研发占据了超过90%的硅基光子技术的相关学术研究,核心目标就是在硅材料上获得性能最好的单元功能器件。目前,硅基的马赫-曾德尔调制器的性能在许多运用中可以媲美甚至超过商用的铌酸锂调制器^[10],并且硅基调制器的性能每年都在提升。从技术优势上来说,基于锗波导耦合的光电二极管与其他近红外非制冷光电探测器相比也很有竞争力。硅波导的损耗可以降低到0.026 dB/cm^[11],可兼容大规模硅光子集成的氮化硅波导的损耗甚至低于0.1 dB/m^[12]。低损耗的光纤耦合器、各种高性能光学无源器件,甚至高效率的激光器(结合III-V族材料)已经在硅基光学系统中实现。大多数的器件设计工作都是在学术圈完成,其优势在于可以快速的实现仿真-制作-测试循环,快速制作出产品原型。

需要注意的是:器件层次的研究并非完全兼容于现有的微电子工艺,那些设计最优性能晶体管的研究人员起初可能也并没有关注设计的器

件是否兼容于现有的工艺。对于硅基光子学也是如此,随着时间的推移,将会促使这些在特定工艺下得到证实的硅基光子器件进入到集成平台中。

3.2 硅基光子集成系统芯片技术

微电子电路设计中,电路的设计者并不需要是晶体管物理和制作方面的专家。由于代工厂已经能够确保器件的性能,电路设计师只需要依赖于唯象模型,在 SPICE 或者 VERILOG-A 软件中模拟复杂的电学系统。总的来说,器件物理工程师为代工厂开发出 PDK,代工厂的用户很少需要运行诸如半导体工艺模拟以及器件模拟工具(TCAD)来模拟晶体管的内部工作机制。对于硅基光子代工厂服务提供商而言,近期的目标就是要能够像微电子行业一样给硅光子提供相同的基础设施服务。目前,一般的硅基光子代工厂服务提供商都提供包括先进光电器件(调制器和探测器等)的 PDK,用户可以利用这些元器件设计出更高性能的器件或者包含更多元器件的复杂硅基光子集成系统芯片。

近年来,硅基光子代工厂服务提供商所能够提供的核心器件的性能已经足够好,越来越多的研究人员已经不需要再在器件层面优化,而是可以针对应用场景,研发特定功能的光学集成回路。硅基光子代工厂服务提供商则负责制作出所需要的硅基光子集成芯片。这意味着,接下来的几年里,硅基光子集成系统芯片设计团队的数量必将比器件设计团队的数量增长的快,这也会推动硅基光子技术的应用和进一步发展。

从这一点来看,硅基光子技术的发展与集成电路技术的发展是有相似性的,我们也期待由此能够带来具有颠覆性的硅基光子技术。当然,硅基光子技术中也必然存在着同微电子模拟电路芯片设计类似的情况,需要对器件技术极为熟悉的专业人员

完成某些涉及器件结构的系统芯片设计。

3.3 硅基光子的设计工具

硅基光子技术的设计生态系统依然处于发展阶段,器件级别的仿真软件已经十分成熟,但是更高级别的系统仿真才刚刚开始出现。晶圆规模的自动化测试、设计规则检查、布局和原理图检查、测试设计工具等要么不存在,要么极其不成熟。

微电子行业最伟大的一项发明就是 PDK,实现了器件设计和工艺完全分离。硅基光子学行业近年来也积极开展相应的工作,研发设计工具和工艺流程来确保硅基光子的成功,但是这些努力相对来说还不够成熟。Luxtera 是第一个开发出基于 Cadence 环境的硅光子高级设计包,其中包括针对光子和电子元器件的布局和原理图检查、设计规则查错,以及标准元器件的统计角模型。许多公司也开发了在 TCAD 级别专用于集成光电学的仿真工具,通常用于电学元器件热和射频的仿真也被用于光学器件及系统中^[13]。这些光学系统级别的仿真软件包括:Lumerical INTERCONNECT、IPKISS 等。

硅基光子学一个重要的创新领域在于研发出匹配工艺线要求的设计规则和方法,以及设计出合适的结构和工艺程序来确保成品率。目前相关的研究在文献资料中很少提及,但是这些问题在接下来几年将变得十分重要。

3.4 封装与外围技术

针对硅基光子的特点与应用需求,硅基光子芯片的封装技术是关键性的支撑技术。虽然已有的集成光学芯片的光学耦合封装技术可以提供一定的支持,但是针对硅基光子成本特点而建立的高效率光学耦合封装依然极为重要。硅基光子芯片可以采用传统类型的单模封装,也可以是具有特点的表面光栅耦合。针对

前者,人们已经初步建立了模斑转换结构与工艺过程,耦合损耗可以控制到 1 dB 每端面,甚至更低;而后者的表面光栅耦合一方面提供了制作过程在线检测的可能,也为大规模表面光学耦合封装提供了可能。当然,除了光学耦合外,硅基光子芯片往往还需要高速电学接口封装。这也就意味着,硅基光子芯片是需要同时考虑光学与电学接口封装的,这对芯片的设计提出了要求。有意思的是,目前来看,这些光学与电学接口往往占据了整个芯片的大量面积。这需要我们有更多技术来进一步提升输入输出的接口,无论是光学,还是电学。

硅基光子的应用决定了芯片外围必然要面对电-光和光-电转换,而且这种转换过程往往还要求是高速、低噪声的。所以高速多位数的模/数和数/模转换、串/并和并/串转换等集成电路芯片,高速、低噪声的跨阻放大器芯片等的应用是必须的,并且应该尽可能向硅基光子芯片靠拢,人们甚至希望能够将这些电路与光路单片集成。由于器件结构和工艺特点上的差异,这种光与电的单片集成是否一定具有优势,最终会由市场来决定。此外,为保证硅基光子芯片的稳定应用,还需采用硅基光子芯片的在线监测技术和温控技术。

对于上述技术,人们都已经意识到其是必不可少的,正在利用联合设计的思路,努力研发并提出各种解决方案。

3.5 硅基光子技术的延伸

硅基光子学的发展也促进了许多基础科学的发展。基于硅基光子,结合新材料(聚合物、石墨烯、量子点等),可以实现更多的光学功能器件。就像超大规模集成电路被证实是科学与工程学上的一项有利技术一样,随着未来硅基光子工艺的开放,光子学将使硅成为探索基础材料科学和物理学的重要平台。与此同时,这将为更多功能和更大规模的硅

基光子集成提供技术支持。在硅基光波导中,光场较高的场密度和较低的损耗已经推动了光力学和量子光学的发展,研究人员正在开展相当数量的量子光学^[14]和低温物理学^[15]方面的研究。此外,由于硅基光子回路具有快速实现新类型的开关和收发器的能力,它也是网络建模工作的理想试验平台^[16]。

4 结束语

硅基光子学以其独特的优势成为当下研究的热点,结合 CMOS 工艺,硅基光子的发展趋势将是更高的速率、更低的功耗以及更高的集成度,并向着产业化推进。文章介绍了硅基光子学发展的历程、技术挑战和发展机遇等若干思考,目前中国的硅基光子经过多年的发展,在器件与集成领域已经取得较大的进展,并且具备了良好的科研队伍和条件。大力发展硅基光子,促使中国在上处于领先地位意义重大!

参考文献

- [1] SOREF R A, LORENZO J P. Single-Crystal Silicon: A New Material for 1.3 and 1.6 μm Integrated-Optical Components[J]. Electronics Letters, 1985, 21(21): 953-954. DOI: 10.1049/el:19850673
- [2] CONWAY L. Reminiscences of the VLSI Revolution: How A Series of Failures Triggered A Paradigm Shift in Digital Design [J]. IEEE Solid-State Circuits Magazine, 2012, 4(4): 8-31. DOI: 10.1109/MSSC.2012.2215752

- [3] MEKIS A, GLOECKNER S, MASINI G, et al. A Grating-Coupler-Enabled CMOS Photonics Platform[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(3): 597-608. DOI: 10.1109/JSTQE.2010.2086049
- [4] CHROSTOWSKI L, HOCHBERG M. Silicon Photonics Design: from Devices to Systems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2015
- [5] HOCHBERG M, HARRIS N C, DING R, et al. Silicon Photonics: The Next Fabless Semiconductor Industry[J]. IEEE Solid-State Circuits Magazine, 2013, 5(1): 48-58. DOI: 10.1109/MSSC.2012.2232791
- [6] IQBAL M, GLEESON M A, SPAUGH B, et al. Label-Free Biosensor Arrays Based on Silicon Ring Resonators and High-Speed Optical Scanning Instrumentation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 16(3): 654-661. DOI: 10.1109/JSTQE.2009.2032510
- [7] HAFEZI M, MITTAL S, FAN J, et al. Imaging Topological Edge States in Silicon Photonics [J]. Nature Photonics, 2013, 7(12): 1001-1005. DOI: 10.1364/CLEO_SI.2014.STu2M.2
- [8] BURLA M, CORTES L R, LI M, et al. Integrated Waveguide Bragg Gratings for Microwave Photonics Signal Processing[J]. Optics Express, 2013, 21(21): 25120-25147. DOI: 10.1364/OE.21.025120
- [9] SUN J, TIMURDOGAN E, YAACOBI A, et al. Large-Scale Nanophotonic Phased Array[J]. Nature, 2013, 493(7431): 195-199. DOI: 10.1038/nature11727
- [10] WATTS M R, ZORTMAN W A, TROTTER D C, et al. Low-Voltage, Compact, Depletion-Mode, Silicon Mach-Zehnder Modulator[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 16(1): 159-164. DOI: 10.1109/JSTQE.2009.2035059
- [11] LI G, YAO J, THACKER H, et al. Ultralow-Loss, High-Density SOI Optical Waveguide Routing for Macrochip Interconnects[J]. Optics Express, 2012, 20(11): 12035-12039. DOI: 10.1364/OE.20.012035
- [12] BAUTERS J F, DAVENPORT M L, HECK M J R, et al. Silicon on Ultra-Low-Loss Waveguide Photonic Integration Platform[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 544-555. DOI: 10.1364/OE.21.000544
- [13] LUMERICAL. INTERCONNECT - Photonic

Integrated Circuit Design Tool[EB/OL].

(2014-04-14) [2017-06-30]. <http://www.lumerical.com/tcad-products/interconnect/>

- [14] HARRIS N C, GRASSANI D, SIMBULA A, et al. An Integrated Source of Spectrally Filtered Correlated Photons for Large-Scale Quantum Photonic Systems[J]. Physical Review X, 2014, 4(4): 041047-041055. DOI: 10.1103/PhysRevX.4.041047
- [15] AKHLAGHI M K, SCHELEW E, YOUNG J F. Waveguide Integrated Superconducting Single-Photon Detectors Implemented as Near-Perfect Absorbers of Coherent Radiation[J]. Nature communications, 2015, 6:8233. DOI: 10.1038/ncomms9233.
- [16] SHACHAM A, BERGMAN K, CARLOLI L P. Photonic Networks-on-Chip for Future Generations of Chip Multiprocessors[J]. IEEE Transactions on Computers, 2008, 57(9): 1246-1260. DOI: 10.1109/TC.2008.78

作者简介



杨建义, 浙江大学信息与电子工程学院微纳电子研究所教授、副院长;主要研究方向为集成光电子、智能感知与信息传输;曾主持多个“973”、“863”、国家自然科学基金项目,相关研究成果曾获国家技术发明奖二等奖、北京市科学技术一等奖和浙江省科技二等奖等;已发表 SCI 收录论文 100 余篇,拥有授权专利 20 余项。



王根成, 浙江大学信息与电子工程学院博士研究生;主要研究方向为硅基集成光电子、光互连及片上光学相控阵天线系统;先后参与多个国家自然科学基金项目、“863”项目等;已发表论文 8 篇,拥有授权专利 2 项。