

对硅基光电子技术发展的思考

Development of the Silicon Photonic Technology

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0052-04

摘要: 硅基光电子技术在其自身优势、市场需求、国家战略的带动下迅速发展, 面临大规模市场化的历史机遇。指出了硅基光电子在硅基多材料体系、大容量信息技术、新型耦合和封装技术等层面所面临的关键问题, 包括有源器件和异质集成问题、超高集成度硅基信息系统实现、高效耦合及封装等。认为建立科研成果和市场产品之间有效的联通桥梁, 促进前沿科研和产业应用的协同合作是解决这一问题的有力手段。

关键词: 硅基光电集成; 多材料系统; 光电封装

Abstract: Driven by its advantages, market demand and national strategy, silicon photonic technology is developing rapidly, and approaching the opportunity of large-scale marketization. In this paper, the key problems of silicon photonics in silicon multi-materials system, massive information technology, and new type of coupling and packaging are analyzed, including active devices and heterogeneous integration, ultra-high integration for silicon-based information system, efficient coupling and packaging. Bridging the gap between scientific research and market product and boosting the collaboration of cutting-edge scientific research and industrial application are solutions to these problems.

Key words: silicon photoelectric integration; multi-materials system; photoelectric package

郝然/HAO Ran

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

- 硅基光电子技术在产品性价比、小型化、集成化、工艺兼容性等市场需求推动下踏步向前
- 发展硅基光电子技术不但是民用经济市场需求的选择, 更是国家战略和国防安全的要求
- 应构建硅基多材料集成生态、发展高集成度硅光技术、革新耦合及封装技术, 解决硅基光电子面临的 key 问题

1 全面需求带动硅基光电子技术发展

21 世纪是大数据时代, 以硅为材料的微电子技术成为了主流信息技术。半个世纪以来, 微电子技术大致遵循着“摩尔定律”快速发展, 人们对信息传输和处理的要求越来越高。随着信息业务的不断拓宽和深入, 芯片的特征尺寸减小到 10 nm 以下, 串扰、发热和功耗成为微电子技术难以解决的瓶颈。虽然微电子技术在产品

都已经非常成熟, 已经是非常完备的产业链, 但是伴随着云计算、大数据等信息业务的蓬勃发展, 微电子技术的瓶颈和高速、宽带的业务需求之间的矛盾已经不可调和。例如: 铜缆已经不能解决芯片间的高速信号互联问题, “光进铜退”已经不可避免, 因此我们迫切需要硅基光子技术^[1]。硅基光电子技术是利用互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺实现光子器件的集成制备, 该技术结合了 CMOS 技术的超大规模逻辑、超高精度制造的特性和光子技术超高速率、超低功耗的优势。硅材料不仅是集成电路最普及的材料平台, 还具备优异的光学性能。硅波导对波长 1.1 ~ 1.6 μm 的

光近乎无损透明, 可较为理想地兼容光通信现有技术与器件, 为高速光通信提供了高集成度的解决方案。业界认为硅光子是当今信息技术中最具发展前途的技术领域。另一方面, 以 III-V 族为材料的有源器件在大规模应用上性价比非常低, 而基于 CMOS 工艺的硅基光电子技术有着低成本、高速、宽带、低损、高集成能力等优点, 是未来集成信息技术的重点发展方向。但是, 硅基光电子技术也存在一些瓶颈, 如: 硅是间接带隙材料, 用作有源器件的利用效率不高, 并且硅光器件的尺寸只在微米量级, 集成度不高等。如何解决硅基光电子技术的这些瓶颈问题, 并将之商业

收稿日期: 2017-07-31
网络出版日期: 2017-09-07

化应用成为亟待解决的难题。

1.1 硅基光电子的技术优势明显

硅基光电子虽然有着高速、宽带的优点,同时兼容CMOS工艺,有优秀的集成能力,但是它属于新兴产业,相比微电子产业来说市场仍处在早期阶段,因此硅基光电子的市场化还有很长的路要走。近年来,大数据、云计算等新兴信息业务发展迅猛,这对未来信息数据的传输量和计算量提出了更高的要求。伴随着新兴业务的发展,硅基光电子技术在下面3个市场需求的变迁中踏步向前。

(1)产品的性价比主导优势。以III-V族为材料的有源光器件性能优异,如InP等,但相比硅基光电子而言成本过高。伴随着数据大浪潮,信息市场在不断细分和扩张,不久的将来,数据中心完成处理至少需要百亿级的计算系统,所需的光电器件将与日俱增。当产品的性价比逐渐成为市场的关键因素时,以InP为衬底的光电器件的成本劣势会急剧放大,同时硅基光电子的低成本优势也会非常明显。

(2)产品小型化、集成化成为基本趋势。随着器件规模的不断增大,为满足提高器件性能、减小连接成本、减低功耗等要求,提高光子组件密度是主要途径,即光电子器件的小型化和集成化是实现这些目标的必然途径。现有的分立光器件体积尺寸较大,例如:传统的铌酸锂电光调制器的器件尺度在厘米级,但基于CMOS工艺的硅基电光调制器能达到微米级。所以硅基光电子必将取代传统分立光器件成为市场发展方向。

(3)制备工艺与现有的CMOS工艺兼容。硅基光电子技术在制备工艺和材料上完全能够与现今大规模普及的CMOS制备技术相兼容,可直接使用现有的CMOS工艺平台加工。

1.2 硅基光电子技术的市场需求强劲

基于新兴信息业务带来的强劲

需求和硅基光电子的技术优势,硅基光电子产业市场近年来迅速增长,并且前景光明。据Yole报告统计预测,自2015年起硅基光子器件将以约45%的年复合增长率持续增长,到2025年硅光子市场规模将超13亿美元。同时,近年来Luxtera、Kotura、Infinera、OneChip等欧美企业已经认识到硅光子的潜力,纷纷增加了对集成硅光子产品的投资。从研究领域看,国际三大光通信国际会议(光纤通信会议(OFC)、欧洲光通信会议(ECOC)、亚洲光纤通信与光电子会议(ACP))近几年也都在会议中增加了硅基光电子学主题,Intel、IBM等跨国公司都有参与硅光的分会,充分体现了硅基光电子技术是未来市场的潜在发展方向。中国的一些科研院所和通信公司,如:中兴通讯、武汉邮科院、光迅等也纷纷未雨绸缪,在硅基光电子方向投入研发,为将来的产品换代做技术储备。

1.3 国家战略和国防安全急需硅基光电子的支撑

硅基光电子技术的发展不但是民用经济市场需求的选择,更是国家战略和国防安全的要求。光电子技术对信息产业的影响已经获得各国的重视。美国国家科学委员会在白皮书《Optics and Photonics: Essential Technologies for Our Nation》中指出“光子学是重拾美国竞争力和维护国家安全的关键”;欧洲21世纪光子咨询专家组在《Towards 2020- Photonics Driving Economic Growth in Europe》中着重强调了光子学在欧洲经济增长中的重要作用。而中国对光电子技术同样非常重视,中国国务院在《中国制造2025》规划中明确提出“掌握新型计算、高速互联、先进存储、体系化安全保障等核心技术,超高速大容量智能光传输技术、未来网络核心技术和体系架构,推动核心信息通信设备体系化发展及规模化应用”。

经过多年的努力,中国在激光

器、调制器、探测器等单元器件,光纤传输,光信号处理等多个方向取得了一定的进展。据国家统计局统计,2015年中国全国光缆线路总长度达到将近2500万千米,光宽带网络的建设已经取得了不小的成绩。但是中国在光电子产业许多方面仍存在差距和技术空白,光电子器件国产化程度很低,在光收发器件领域,速率为10 Gbit/s的光收发器件的国产化率只有4%,40 Gbit/s的光收发机仍是空白。据OVUM等权威机构统计,目前中国高端光电子芯片有30%从美国进口、65%从日本进口。由于核心光电子器件和芯片的进口逐渐受到西方发达国家的禁售政策的影响,中国的光电子技术与集成产业链被发达国家所制约,未来信息产业的核心理命门受制于人。

除了信息产业的战略安全外,国防安全和航天事业也需要硅基光电子技术的鼎力相助。现代军事国防系统基于微电子技术建立而成,随着武器的更新换代,武器、控制系统对电子器件的重量、体积的要求越来越高,为了满足中国武器和航天技术轻量化、小型化、高速化的发展需求,包括机载武器、航天卫星、相控阵雷达的传输和控制模块都已经向光子化发展。

2 机遇背后就是挑战:硅基光电子发展的关键问题

大数据浪潮随着新兴信息业务席卷而来,为硅基光电子创造了巨大的需求市场,这是硅基光电子产业崛起的巨大机遇,同时也是一项艰巨的挑战。硅基光电子技术虽然如前文所述有着诸多优势,但随着加工制造的不断深入,仍存在着许多关键问题亟待解决,这些关键问题是硅基光电子走向市场化的“拦路虎”。需要运营商、厂商等研究机构协同合作,发挥创新精神,攻坚克难。

(1)基于硅基衬底的高效有源器件及异质集成问题。

硅是一种间接带隙半导体材料,其光发射是典型的声子辅助的低几率过程(复合寿命范围为毫秒量级),所以相比InGaAsP、InP等直接带隙材料,硅材料的发光效率低,难以直接制备硅基激光器、探测器等有源器件,这是硅材料内在能带结构的物理瓶颈所决定的。因此如何基于硅衬底实现高效有源光电器件(结合其他新材料和III-V族材料)是个重大问题。利用直接带隙III-V族材料的有源器件和低成本低损耗的硅是目前光通信系统中普遍的解决方案,但是硅衬底的异质集成也是各企业研发部门和制造商需要面临的一大课题。

(2) 超大信息容量的硅基系统的实现问题。

虽然现阶段硅基光电子技术相比微电子技术而言有明显的宽带优势,但是由于光学衍射定律的存在,光子器件的尺寸不能小于波长的 $1/2$,因此现有光子器件的尺寸还在微米量级,比电子器件大的多。如何突破衍射极限,把硅基光电器件的尺寸减小至纳米尺度,是当前亟需解决的一大难题。表面等离子激元是目前有望突破光学衍射限制的技术途径,但也还存在着损耗、工艺等难题未解决;新兴的二维纳米材料,如:石墨烯、二硫化钼等,由于本身只有一个原子的厚度可以进一步突破衍射极限^[2],提高系统的集成度,仍然处于研究的初级阶段,离商业应用还有较大距离。

(3) 硅基光电子高效耦合问题。

硅基波导耦合器是硅基集成光电芯片上的光信号和外部光纤光信号之间的互联接口。片上硅基光波导的尺寸在数百纳米级别,单模光纤的芯径尺寸约为 $10\ \mu\text{m}$,尺寸上的巨大差距必然导致耦合的模式失配,造成极大的耦合损耗($>25\ \text{dB}$)。为了解决模式失配的问题,业界主要采用的耦合方式有两种:倒锥形端面耦合和光栅耦合。倒锥形端面耦合是通过一个倒锥形结构的耦合器将光纤中

的光信号耦合入硅波导中,这种耦合方式带宽大,光信号的偏振相关性小,工艺相对复杂,采用蝶形封装,封装成本较高。相对地,光栅耦合是将光纤中的光信号垂直入射到耦合光栅中,进而耦合到硅波导中,这种耦合方式的工艺简单,成本较低,但是耦合带宽小,对光信号偏振敏感。这两种耦合方式的耦合效率都不尽如人意(约为 $3\ \text{dB}$),需要进一步探索提高耦合效率。

(4) 硅基光电子的封装问题。

相比硅基光电子器件的片上集成,硅光电子的封装问题往往被轻视。一方面,由于硅基光电子接口封装技术仍处于初期阶段,主要问题是光电子芯片和光纤阵列组件的光接口封装,其难点主要在于对准与封装精度要求高,直接导致封装成本过高,封装效率低下。目前的封装技术难以实现高效率、低成本的光接口封装,这将大大延缓硅基光电子的大规模应用。另一方面,相比微电子芯片的封装问题,硅光电子多了一个光的物理复杂度,封装问题更加复杂、难度更大,特别是针对高集成光电子器件芯片,许多方面的工程制造经验仍处于空白。模块化封装难以同时保证高耦合效率和高稳定可靠的高频响应特性;由于硅波导的有效折射率实部对温度敏感,硅基光电子器件的光学性能往往对热环境有较高要求;同时,集成化器件之间还存在着大量的光、电、热相互串扰和相互作用:因此硅基光电子芯片封装的多物理问题比微电子封装更加严重突出。现有的封装技术难以同时消除器件之间的相互串扰,故而需要研究新的封装技术和工艺。

3 多方向、多层次共同努力 破难关

硅基光电子集成是下一代信息技术的发展方向,然而如前段所述,硅基光电子面临着一些关键问题急需解决,为了进一步向大规模市场化

前进,必须针对这些关键问题,进行多方向、多层次的技术攻关。

(1) 构建硅基多材料集成生态。

为了解决硅基有源器件效率低下的问题,必须以硅基材料为主,结合其他直接带隙的材料体系共同构建硅基多材料集成生态。在靠近市场的企业研究层面,构建硅基和InP等III-V族有源器件的混合集成生态,实现低损、低成本的硅器件基波导和高效率III-V族有源器件的优势互补。必须研究硅基/InP基混合集成中面临的材料生长和制备工艺兼容性难题的新机理,并探索混合集成光源和硅波导之间的键合方式。硅基多材料集成生态不但要研究工艺上的材料兼容问题,还要注意异质材料的器件之间模式兼容问题,特别是无源硅基波导和有源III-V族材料器件的模式转换问题。由于异质材料之间的光学材料特性有着明显差异,所以激光器的腔模和硅基波导之间会存在显著的模式失配,直接耦合会引起极大的耦合损耗和模式泄露。因此异质的有源器件和硅基无源器件的模式转换问题非常有必要。在靠近学术研究的高校研究层面,可以基于石墨烯、二硫化钼等新型二维材料研究高效的硅基有源器件,例如:石墨烯是一种零带隙的二维材料,具有良好的光学特性,利用石墨烯的泡利阻断效应可以设计微米级的、与CMOS工艺兼容的硅基吸收型调制器。所以,结合新型二维光学材料是发展硅基有源器件的重点方向,但目前针对二维光学材料的研究仍然停留在实验室阶段,还未与企业研发相衔接。

(2) 发展新型高集成度硅光技术。

由于光子的衍射极限,在均匀介质中模场大小难以限制在光子半波长以下,从而制约了硅基光电子的深度集成,表面等离子激元有望解决这一问题。表面等离子激元是光与金属自由电子相互作用下,在金属-介质界面产生的电子共振。表面等离子激元

有两种形式:局域表面等离子体激元(LSPs)和表面等离极化激元(SPPs)。LSPs是电子与电磁场耦合的非传播的激发,主要涉及很小的纳米颗粒的散射问题。SPPs是沿金属表面传播的极化波。SPPs在垂直金属表面上形成消逝场,场振幅呈指数衰减,因此SPPs的电磁能量被强烈地约束在表面附近,具有强大的近场增强效应;而沿金属表面由于欧姆热效应,只能传播有限距离。利用表面等离子体微纳结构制备光波导、传感器、探测器、调制器和太阳能电池等光学器件,不仅使器件尺寸缩小了几个数量级,而且提高了器件性能。表面等离子体光学才刚刚起步,用于等离子体产生、操纵和探测的器件集成仍然是一个艰难的挑战。随着微纳加工技术的发展,表面等离子体将在纳米硅基光子学方面发挥着越来越重要的作用。另一方面,二维材料由于单原子厚度的几何和特殊能带结构也能突破衍射极限。如:石墨烯是一种碳原子以 sp^2 杂化方式组成的单原子层二维材料,并且由于其稳定的晶格结构能够形成独特的能带结构。基于二维结构和特殊的能带结构,光子模场能够紧紧束缚在石墨烯表面,形成石墨烯等离激元。基于不同的结构,光场能以不同的模式限制在石墨烯上,如:在石墨烯带结构中光场将被束缚在石墨烯两侧,在硅-石墨烯复合结构中光场将被规律性地约束在整个石墨烯表面等。石墨烯表面等离激元与传统的金属等离激元相比,石墨烯的光场束缚性更强,同时由于石墨烯等离激元可以通过石墨烯费米能级、载流子浓度等进行调控,具有非常好的灵活性。更重要的是,二维材料一般能够与硅基工艺很好地兼容。因此基于表面等离激元和二维材料能够进一步发展深度集成的硅基技术,有助于实现超大信息容量的硅基系统。

(3)革新硅基光电子的耦合及封装技术。

现有耦合方式效率较低,需要进一步优化耦合方式,通过设计被动式的高效、高精度光纤阵列对准系统,降低光接口封装成本,提高光纤组装效率。为了有效消除硅基光电子芯片内各器件之间的相互串扰和相互作用,解决芯片的多物理场问题,应在传统电、热多物理的问题基础上,增加光的物理维度,仔细探究光热相互作用的机理和光电的兼容集成问题^[1],建立集成光电子器件的封装模型,在传统封装技术基础上推陈出新,建立集成光电子器件标准化的新型封装技术。此外,还需要仔细研究如何通过这种封装技术解决硅基芯片的多物理问题。

4 协同合作才是康庄大道

(1)学术、产业界的协同合作

硅基光电子器件及集成技术的诸多研究仍停留在实验室阶段,未进入产业界的研发阶段。利用石墨烯、二硫化钼等二维材料能够实现CMOS兼容微米级高效的有源硅基器件,包括调制器、探测器等,实现硅基高效有源无源器件体系的建立。利用金属-介质、二维材料石墨烯的表面等离激元技术深入发展新型高集成度硅光技术,从而构建超大容量硅基通信系统。通过研究硅基光电子器件内部光、电、热相互耦合机理,建立多物理问题模型,可以系统地研究硅基光电的封装问题。只有前沿科研和产业研发的共同协作,建立科研成果和市场产品之间有效的连通桥梁,才有希望实现硅基光电子的重大突破。

(2)产业界内部合作

快速构建硅基和III-V族有源器件的混合集成生态需要传统InP基的III-V族材料厂商和硅基光电子厂商的协同合作。工艺技术的积累不是一朝一夕的努力,要想快速实现硅基的混合异质集成系统,必须将III-V族的有源光器件技术和硅基光电子技术共同结合,因此厂商之间的内部合作是一种有效的捷径,将大大缩短

研发时间,促进硅基光电子器件和集成技术的市场化。

5 结束语

在大数据、云计算等新兴信息业务的催化下,硅基光电子技术由硅基技术优势支撑,由市场需求驱动,并在国家发展方针的指导下面临着大规模市场化的历史机遇。如何抓住这一历史机遇,突破艰巨的研究挑战,缩小与发达国家在硅基光电子产业方面的差距,是产业界和学术界需要共同承担的历史责任。通过构建硅基多材料集成生态,发展高集成度硅光技术,革新耦合及封装技术,有希望能解决硅基光电子面临的关键问题,包括:有源器件和异质集成问题、超大容量硅基信息系统实现问题、高效耦合及封装问题,最终达到硅基光电子的大规模市场应用的目标,实现信息系统的更新换代。当然这需要产业界和学术界建立有效的合作体系,并通过长期的共同努力才能实现。

参考文献

- [1] 周治平. 硅基光子学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012
- [2] HAO R, PENG X L, LI E P, et al. Large Slow Light Capacity in Graphene-Based Grating Waveguide[J]. Scientific Reports 2015, 5: 15335. DOI: 10.1038/srep15335
- [3] LEE J S, CARROLL L, SCARCELLA C, et al. Meeting the Electrical, Optical, and Thermal Design Challenges of Photonic-Packaging[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(6): 1-9. DOI: 10.1109/JSTQE.2016.2543150

作者简介



郝然,浙江大学信息与电子工程学院副教授、博士生导师;主要研究方向为基于二维材料光器件和硅基微纳光电系统;曾获法国国家奖学金、求是青年学者、URSI青年科学家奖,曾主持国家自然科学基金2项、浙江省杰出青年基金1项,参与“973”国家重大基础研究计划1项;近5年已发表SCI论文50余篇,总引用次数超1000次。