



信息通信领域产学研合作特色期刊
 第三届国家期刊奖百种重点期刊 | 中国科技核心期刊

ISSN 1009-6868
 CN 34-1228/TN

中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

tech.zte.com.cn

2017年10月 • 第5期

专题：硅基光电子集成技术与器件



中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

二〇一七年十月

第二十三卷第五期

总第一三六期



《中兴通讯技术》第7届编辑委员会委员名单

顾问 侯为贵（中兴通讯股份有限公司创始人） 钟义信（北京邮电大学教授） 陈锡生（南京邮电大学教授）

主任 陆建华（中国科学院院士，清华大学教授）

副主任 赵先明（中兴通讯股份有限公司总裁） 糜正琨（南京邮电大学教授）

副主任 马建国（广东工业大学教授） 陈前斌（重庆邮电大学副校长）

编委（按姓名拼音排序）

- | | |
|---------------------------------------|------------------------------------------|
| 曹淑敏 中国信息通信研究院前任院长 | 谈振辉 北京交通大学教授 |
| 陈建平 上海交通大学教授 | 唐雄燕 中国联通网络技术研究院首席专家 |
| 陈杰 中兴通讯股份有限公司高级副总裁 | 童晓渝 中电科软件信息服务有限公司副总经理 |
| 陈前斌 重庆邮电大学副校长 | 王京 清华大学教授 |
| 葛建华 西安电子科技大学通信工程学院副院长 | 王文东 北京邮电大学软件学院副院长 |
| 管海兵 上海交通大学电子信息与电气工程学院副院长 | 王翔 中兴通讯股份有限公司副总裁 |
| 洪波 中兴发展股份有限公司总裁 | 王喜瑜 中兴通讯股份有限公司副总裁 |
| 洪伟 东南大学信息科学与工程学院院长 | 卫国 中国科学技术大学教授 |
| 纪越峰 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院
执行院长 | 吴春明 浙江大学教授 |
| 蒋林涛 中国信息通信研究院科技委主任 | 邬贺铨 中国工程院院士 |
| 李尔平 浙江大学信息学部副主任 | 徐安士 北京大学教授 |
| 李红滨 北京大学教授 | 续合元 中国信息通信研究院技术与标准研究所总工 |
| 李建东 西安电子科技大学副校长 | 徐慧俊 中兴通讯股份有限公司执行副总裁 |
| 李军 清华大学教授 | 薛一波 清华大学教授 |
| 李乐民 中国工程院院士，电子科技大学教授 | 杨义先 北京邮电大学教授 |
| 李融林 华南理工大学教授 | 杨震 南京邮电大学校长 |
| 李少谦 电子科技大学通信与信息工程学院院长 | 尤肖虎 东南大学教授 |
| 李涛 南京邮电大学计算机学院院长 | 张宏科 北京交通大学教授 |
| 李星 清华大学教授 | 张平 北京邮电大学网络技术研究院执行院长 |
| 刘建伟 北京航空航天大学教授 | 张云勇 中国联通研究院院长 |
| 陆建华 中国科学院院士，清华大学教授 | 赵慧玲 中国通信标准化协会网络与业务能力技术工作
委员会主席 |
| 马建国 广东工业大学教授 | 赵先明 中兴通讯股份有限公司总裁 |
| 孟洛明 北京邮电大学教授 | 郑纬民 清华大学教授 |
| 糜正琨 南京邮电大学教授 | 钟章队 北京交通大学教授 |
| 庞胜清 中兴通讯股份有限公司执行副总裁 | 周亮 南京邮电大学通信与信息工程学院副院长 |
| 孙知信 南京邮电大学现代邮政学院院长 | 朱近康 中国科学技术大学教授 |



信息通信领域产学研合作特色期刊
第三届国家期刊奖百种重点期刊
中国科技核心期刊
工信部优秀科技期刊
中国五大文献数据库收录期刊
ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN
1995年创刊

办刊宗旨

以人为本,荟萃通信技术领域精英;
迎接挑战,把握世界通信技术动态;
立即行动,求解通信发展疑难课题;
励精图治,促进民族信息产业崛起。

Contents 目次

中兴通讯技术 总第136期 第23卷 第5期 2017年10月

专题:硅基光电子集成技术与器件

- 02 硅光子通信产品技术和商业化进程 孙笑晨,张琦
- 07 硅光子芯片工艺与设计的发展与挑战 郭进,冯俊波,曹国威
- 11 基于复模式匹配的半矢量硅基光波导模式求解方法 赵佳,韩林,黄卫平
- 15 宽带电光调制器的研究现状与新型硅基混合集成调制器的发展趋势 李金野,于丽娟,刘建国
- 21 硅基马赫曾德电光调制设计优化与实现 周林杰,周砚扬,陆梁军
- 30 多维复用硅基集成光子器件 储涛,郭德汾,吴维轲
- 34 基于高Q值氮化硅微环反射镜的窄线宽单模光纤激光器 章元珏,李渔,陈明华
- 38 25 Gbit/s CMOS 直接调制 DFB 激光器驱动电路 石泾波,祁楠,Patrick Yin CHIANG
- 43 硅基片上光电传感及相关器件 周治平,邓清中

专家论坛

- 47 硅基光子技术发展的特点、机遇与挑战 杨建义,王根成
- 52 对硅基光电子技术发展的思考 郝然

企业视界

- 56 5G 承载网的需求、架构和解决方案 李光,赵福川,王延松

技术广角

- 61 智能工厂的感知、通信与控制 关新平,吕玲,杨博

综合信息

- 《中兴通讯技术》2018年专题计划 (20)

期刊基本参数:CN 34-1228/TN*1995*b*16*64*zh*P* ¥ 20.00*15000*13*2017-10

Contents 目次

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 23 No. 5 Oct. 2017

Special Topic: Silicon Photonics: Technologies and Device Integration

- 02 Technology and Commercialization Progress of Silicon Photonics Communication Products SUN Xiaochen, ZHANG Qi
- 07 The Progress and Challenges of Silicon Photonics Process and Design GUO Jin, FENG Junbo, CAO Guowei
- 11 Two-Dimensional Semi-Vectorial Silicon Optical Waveguide Mode Solver Based on Complex Mode-Matching-Method ZHAO Jia, HAN Lin, HUANG Weiping
- 15 Broadband Electro-Optical Modulator and Development Trend of New Silicon-Based Hybrid Integrated Modulator LI Jinye, YU Lijuan, LIU Jianguo
- 21 Design Optimization and Implementation of Silicon Mach-Zehnder Electro-Optic Modulators ZHOU Linjie, ZHOU Yanyang, LU Liangjun
- 30 Silicon Photonic Devices for Wavelength/Mode/Polarization Multiplexing CHU Tao, GUO Defen, WU Weike
- 34 Narrow Linewidth Single Frequency Fiber Laser Based on High-Q Silicon Nitride Microring Reflector ZHANG Yuanjue, LI Yu, CHEN Minghua
- 38 A 25 Gbit/s CMOS Directly Modulated DFB Laser Driver Circuit SHI Jingbo, QI Nan, Patrick Yin CHIANG
- 43 Silicon-Based Optical Devices for On-Chip Sensing ZHOU Zhiping, DENG Qingzhong

Expert Forum

- 47 Features, Opportunities and Challenges of Silicon Photonics YANG Jianyi, WANG Gencheng
- 52 Development of the Silicon Photonic Technology HAO Ran

Enterprise View

- 56 Requirements, Architecture and Solutions for 5G Transport LI Guang, ZHAO Fuchuan, WANG Yansong

Technology Perspective

- 61 Co-Design of Sensing, Communication and Control for the Smart Factory GUAN Xinping, LYU Ling, YANG Bo

敬告读者

本刊享有所发表文章的版权,包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权,所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。

未经本刊许可,不得以任何形式全文转载本刊内容;如部分引用本刊内容,须注明该内容出自本刊。

2017年第1—6期专题

1 NB-IoT 体系标准与应用

王喜瑜 中兴通讯股份有限公司 副总
孙知信 南京邮电大学 教授

2 通信网络重构新技术

赵慧玲 中国通信标准化协会网络与业务能力技术工作委员会主席

3 5G 无线传输技术

卫国 中国科学技术大学 教授

4 神经网络与深度学习

焦李成 西安电子科技大学 教授
杨淑媛 西安电子科技大学 教授

5 硅基光电子集成技术与器件

陈建平 上海交通大学 教授
张佩华 中兴通讯股份有限公司 技术总监

6 虚拟现实技术与应用

潘志庚 杭州师范大学 教授



陈建平

上海交通大学特聘教授、校学术委员会秘书长，第7届国务院学位委员会学科评议组成员，曾担任《IEEE Journal on Selected Areas in Communications》等编委；主要从事光子信息处理器件与系统应用研究；作为首席科学家和项目负责人，完成或正在承担多项国家“973”计划项目、国家自然科学基金仪器专项和重点项目、国防“863”项目、国防重大专项和重点预研项目等，曾获国家教学成果奖、国家教育部科技进步奖、上海市自然科学奖；持有国际和中国发明专利40余项。



张佩华

中兴通讯股份有限公司光通信技术总监；主要从事光接入产品、光传输产品的系统设计、产品规划、市场拓展等工作，现负责中兴通讯有线通信技术的预研、产学研合作等；作为项目负责人和核心成员完成或正在承担多项国家“863”计划项目、发改委宽带技改项目、工信部工业转型升级项目等，曾获广东省科学技术进步奖；持有专利10余项。

导读

随着信息技术的广泛应用和各种通信手段的不断发展，从遍布全球的光纤骨干网络、连接千家万户的光纤接入网，到大规模数据中心、计算机中央处理器（CPU），都面临着日益增长的海量数据信息传输和处理的压力，随之也孕育着巨大的商机。在传输介质方面，由诺贝尔奖获得者高锟博士发明的光纤具有优异性能，能够应付信息传输容量的挑战。光纤传输的主要问题在完成电-光/光-电转换，各种复用/解复用以及光交换等功能的光电子器件上。传统的光电子技术由于材料多样性和工艺复杂性，在集成化和批量化生产方面受限，存在成本高、体积大、功耗大等问题，在一定程度上制约了光传输特别是光互连技术的发展。20世纪末至21世纪初发展起来的硅基光电子集成技术为光电子器件的发展带来了曙光。

硅基光电子集成技术利用成熟的微电子互补金属氧化物半导体（CMOS）工艺设备，在绝缘体上硅（SOI）上制造用于光通信、光互连和光信号处理的光电子器件和芯片，可实现低成本、批量化生产。它是国际光通信领域一项新兴的热点技术，目前商用化产品已经问世。业内人士预计其市场年均复合增长率将超过30%，将是一项颠覆性的光电子集成技术。

当然，硅基光电子技术也面临巨大挑战。硅是间接带隙材料，无法通过受激辐射产生激光或实现光放大，需要采用异质生长或键合的方法制作基于III-V族材料的激光器。另外，硅材料没有线性电光效应，需要通过载流子色散等效实现电光调制。CMOS工艺是面向微电子技术优化的，经过数十年的发展，已逐步趋向成熟。与其相比，硅基光电子集成技术在标准化元器件库、仿真建模、计算机辅助设计、工艺流程优化、封装技术等方面，还有很多工作需要开展。再有，虽然硅基光电子集成工艺与CMOS兼容，但从成本等方面考虑，目前主要采用180 nm工艺，因此无法在同一工艺上将高速驱动电路直接与光电子器件集成在一起。

除了通信应用外，以光子和电子为信息载体的硅基光电子集成技术，还可以实现片上传感、微波光子信号处理、量子信息处理等，有望在日常生活和工农业生产、航天航空、生物医疗、量子通信等领域获得新应用。

硅基光电子集成技术与器件的发展前景究竟如何？所面临的问题与挑战究竟怎样解决？它的发展对传统的信息技术和产业会造成怎样的影响？我们应该如何抓住机遇实现快速发展？这些不仅涉及技术问题，还和政策、策略等多方面因素有关。本期专题就硅基光电子集成技术的发展现状和趋势、关键器件和实现手段、工艺技术和设计方法，开展专题讨论。本期专题论文来自高校、中科院、中电集团以及中兴通讯等中国硅基光电子研究优势单位的专家学者，凝聚了他们多年的研究成果和工作经验，希望能给读者提供有益的启示和参考。在此，对各位作者的大力支持表示衷心感谢。

陈建平 张佩华

2017年8月31日

硅光子通信产品技术和商业化进程

Technology and Commercialization Progress of Silicon Photonics Communication Products

孙笑晨/SUN Xiaochen
张琦/ZHANG Qi

(中兴光电子技术有限公司, 江苏 南京
210000)
(ZTE Photonics Technology Co., Ltd.,
Nanjing 210000, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0002-005

摘要: 通过对硅光子商业化进程特别是一系列成功和失败案例的介绍, 解释了硅光子所依赖的生态系统的重要性及其对具体技术路线和商业模式选择的影响, 并结合最新的硅光子产品开发和量产情况, 指出了硅光子在各种产品方案中的优势和挑战。

关键词: 硅光子; 集成光子; 光子集成电路 (PIC)

Abstract: In this paper, through a brief review of silicon photonics history with an emphasis on the successes and failures of its commercialization progress, the importance of the ecosystem silicon photonics relies on and its impact on the choices of technical paths and business models are analyzed. With the latest status of silicon photonic product development in the industry, the advantages and the challenges of current and emerging product solutions are identified.

Key words: silicon photonics; integrated photonics; photonic integrated circuit (PIC)

1 硅光子技术和商业化回顾

在20世纪中期, 半导体产业刚兴起时便有人提出过在硅材料上制作波导等光学结构的想法, 但这一领域的真正启动始于20世纪80年代末至90年代初 SOREF Richard^[1,2]和 REED Graham^[3]等人的一系列早期工作。硅光子领域的基础是硅半导体生态系统, 而这个基础则决定了硅光子发展的各个里程碑处处呈现出集成了成电路 (IC) 的技术发展和影响的影子。

硅光子基于 IC 技术的特点使它很早便进入了一些 IC 大公司的视野。在 21 世纪初, IBM、Intel、Sun Microsystems (后并入 Oracle)、NTT/NEC 等公司便设立独立硅光子部门并投入大量资源, 和学术界齐头并进地进行硅光子科研, 这种情况以往并不常见。和资源有限的学术界不同, 这些公司本来就处于 IC 生态系统的领导地位, 能利用更多工艺和配套的资源, 以独立或与学术界合作的形式为很多重要的结果做出了巨大的贡

献, 包括高速调制器、锗探测器^[4]、低损光波导^[5]和混合集成的结果。另一个突出的现象是绝大多数目前被广泛认为取得成功的硅光子初创公司均创立在这 10 年间, 包括前 5 年的代表 Luxtera、Kotura、Lightwire 和后 5 年的代表 Aurion、Acacia (硅光子为其主要技术点之一)。

半导体工艺对硅光子而言, 具有举足轻重的作用; 但由于硅半导体产业的规模十分庞大, 绝大多数 Foundry 注重规模效应, 很难在一个新技术并未有明确产品化验证和市场规模之时给予资源支持, 所以除了少数如 IBM/Intel 利用公司内部资源和 Luxtera 在大量投资支持下说服 Freescale (后被 NXP 收购) 进行工艺开发, 最初的工艺只能在资源有限、设备落后的学校和研究机构的实验室进行。所幸以欧洲著名 IC 工艺研发机构 imec 为代表的一些具有比较前沿半导体工艺能力的机构, 开始投入

资源进行专门开发为硅光子优化的工艺, 并做出了很多优秀的结果。因此, 这段时间的很多科研成果一方面归功于设计上的创新和优化, 另一方面离不开逐渐进步的工艺。2005 年以后, 除 Kotura 等少数有特殊工艺需求的方案外, 大多数工艺开发机构逐渐把硅波导的工艺控制在厚度为 220 ~ 400 nm (尤其是 220 nm) 的绝缘衬底上的硅 (SOI) 平台上, 这种标准化对之后硅光子的商业化发展具有极其重要的意义。

硅光子的真正产品化是在 2010 年之后, 突出表现为一系列通信系统公司对硅光子初创公司的高价收购。在这期间, 有更多的初创公司出现, 这些新创立的公司大多把目光瞄准了异军突起的数据中心市场, 但目前仅 Luxtera 有稍具规模的产品销售。当前的产业化阶段和行业特点对初创公司的发展有着十分严峻的挑战。

收稿日期: 2017-08-06
网络出版日期: 2017-09-14

在工艺研发方面,除 imec 外,更多的机构如新加坡的 IME、法国的 CEA Leti、日本的 PETRA 和美国以 SUNY 为前身新设立的国立 AIM Photonics,都陆续形成了稳定的研发(甚至小量生产)工艺线,为科研院所和初创公司提供了工艺上的巨大支持。中国的硅光子工艺起步虽晚,但发展很快。近几年在中芯国际、中科院微电子所和半导体所等都有一些不同程度的工艺开发,不过工艺成熟度离以上几家仍有差距。

目前硅光子较为成功的产品主要应用在数据中心和相干传输两个领域。从实用主义角度出发,我们认为各种利用了各级别硅半导体工艺和生态系统的、有价值的光芯片产品都可称为硅光子产品。另外,我们还认为其他材料体系(如 GaAs 等)仍有其存在的必要性,InP 为基础的光芯片并不会消失或被替代,尤其是在目前硅光子仍极度依赖高性能的 InP 激光器的情况下。在未来相当长一段时间里,硅光子和 InP 的产品都将不断继续进步并互为补充。

2 硅光子技术在数据中心中的应用

使用硅做光芯片,正如半个世纪前使用硅做 IC 芯片一样,都不是从性能上最好的材料平台选择。直到今日,基于 GaAs 和 InP 的 IC 产品仍然在很多应用上有着不可替代的作用。在 IC 的半个多世纪的发展历史中,硅的原料丰富性、可规模制作性、稳定的化学性质、理想的力学和热学性质、高质量的氧化物、灵活的可掺杂性等各种性质,决定了它能够战胜各种对手材料而形成今天绝对的主导地位。在这个过程中,针对硅材料和工艺的大量研究投入,以及全世界硅半导体产业不断进步和细分,产生了一个庞大的生态系统。其工艺和产品质量的高度稳定性和可重复性,以及有保障的快速量产增速的优势使得凡是能搭上这个生态系统的产

业都具备了极大的优势,典型的成功例子为微机电系统(MEMS)、图像传感器,目前两者皆已成为百亿美元量级的领域,虽然仍不足整个半导体产业的 3%。

同样,对于硅光子,大多数清醒的从业者尤其是产业界,看中的并不是它的性能,而是上面提到的这些优势;但利用庞大半导体生态系统并不是没有缺点,由于这个产业的专业细分化和各层次的高度成熟性,使得在未形成有效的 Fabless-Foundry 模式前,进入的门槛和初始的投入非常大。无论对于初创公司还是大公司的部门,都需要准备大量的研发资源并仔细考虑其应用场景。应用场景的定位,在 21 世纪初十分模糊的,当时的一些看法和今天真正的产品有很多差异。按照上面提到的特点,可以预见有意义的产品方向为:数量大、成本敏感但对性能要求不高的,以及成本不敏感但对集成小型化有强烈要求的。

数据中心(特指互联网的超大型数据中心,而不是企业级)的出现具有一定的偶然性。在硅光子发展的早期,并没有这个领域。由于上述原因,不少人把目光转向了在光通信中数量最大的无源光纤网络(PON)领域,但 PON 领域的应用由于功能结构简单而形成了基于 TO 封装的高度自动化低成本方案,随着 Exponent 和 Onechip 等利用 InP 或其他材料的各种集成方案的相继失败,使得硅光子从业者把目光转移到其他方向。

在早期成立的几个初创公司中,Kotura 偶然找到了一个很小众的特殊可调光衰减器(VOA)应用,Luxtera 通过 Molex 曾短暂打入了 40 G 有源光缆(AOC)的一些独特客户群,而 Lightwire 被 Cisco 收购后则专注于内部定制的小众 CPAK 产品。直到以 Google、Amazon、Microsoft 等互联网公司以及其他 Co-location 客户陆续跟进的超大型数据中心的建设和升级运动开始,Luxtera 等硅光子公司终于找

到了一个真实的方向。

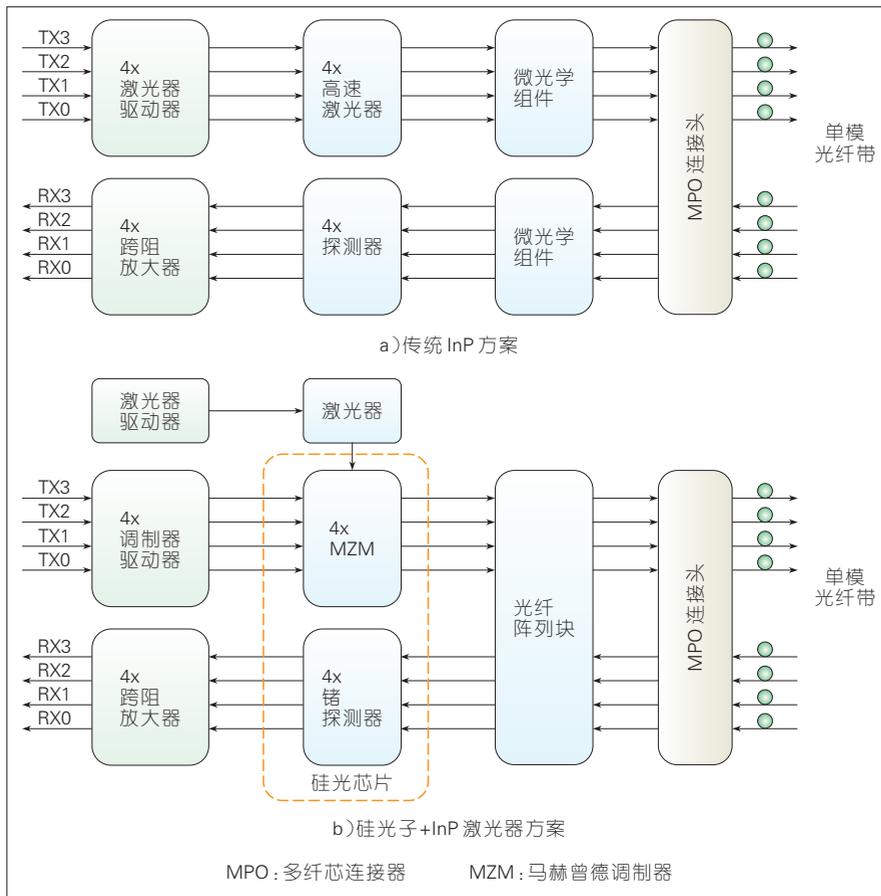
值得注意的是:这一轮数据中心的兴起,硅光子并不是唯一的受益者。事实上,使用传统的 InP 加微光学耦合方案的公司,在数据中心指标降低的情况下,由于其积累多年的技术储备和量产经验,是目前获益最多的。硅光子方案已形成产品的主要竞争者 Luxtera 和 Intel 目前以激进的定价为主要武器,并皆以此为机会积累硅光子产品量产经验以面对未来增产和其他可能出现的市场。

在最近这一轮数据中心光通信模块采购大潮中,100 G 4 通道 28 G 小封装可插拔光模块(QSFP28)是最引人注目的产品,也是硅光子真正形成量产的产品,这类产品主要有两类:用于 500 m 以下的 4 通道并行单模(PSM4)方案和用于 2 km 的粗波分复用(CWDM)方案。这些方案也是未来 200 G/400 G 甚至更高速的应用中的基础,有相应的解决方案提议。

2.1 PSM 的方案

PSM 方案为使用多根单模光纤实现多通道通信,而总带宽达到整体要求的方案。这类方案由于使用的光纤数目多于各种波分复用(WDM)的方案,传输距离不能过长,否则光纤的成本将掩盖方案本身的成本优势。方案的主要优势在于成本,因为每个通道可以使用同样 1 310 nm 波长的激光器且没有 Mux/DeMux 元素,在组件和封装上都具有成本优势。PSM 是目前硅光子最成熟且实现量产的产品方案。

图 1 中描述了 100 G PSM4 典型 InP 方案和硅光子+InP 激光器方案。在传统 InP 方案中,4 组 InP 的激光器为高速激光器(如 25 Gbit/s),并使用其进行信号调制。由于距离短,对激光器的出光功率、消光比和啁啾要求很低,激光器的制造商基本把精力放在调制速率上,目前此类激光器的需求非常大,不少厂家已经在扩产。激光器和光纤的耦合一般使用透镜主



▲图1 100G PSM4示意

动有源对准,对准难度不太复杂。接收端一般使用探测器阵列,配合光纤阵列头和透镜组进行耦合,也有使用单独通道的耦合方式,对准精度要求不高,但也以有源为主。使用此类方案目前产量较大的代表为 Applied Optoelectronics、Innolight 等,不少中小模块厂商都在试图进入这个市场。

从图1中可以看出:硅光解决方案中的硅PIC芯片包含4个马赫曾德调制器(MZM),同时使用一个激光器作为光源给4个调制器供直流光。PIC芯片同时集成锗硅光探测器(PD),并一般把4进4出的8个光纤接口做成光栅耦合阵列和光纤阵列块一次性耦合,减少封装步骤。从组件成本来看,假设硅光方案的2个IC芯片(4通道高速调制器驱动和单通道DC激光器驱动)和InP方案里IC芯片(4通道高速激光器驱动)在未

来基本相当,主要的成本比较为:硅光子集成电路(PIC)芯片、DC大功率激光器芯片(4路共用、调制器损耗和耦合损耗需要大功率的光源来弥补)以及耦合激光器和光纤阵列的相应无源组件;InP 4个高速激光器芯片,4个PD芯片和耦合光纤的相应无源组件。此外,和IC不同,对于光器件,还有占相当比重的封装成本。对于这类综合成本的比较,每个公司因为具体方案的差异,外人很难做出准备判断,但共识的一点为目前没有哪一方有压倒性的优势。这里需要特别强调的是激光器的耦合方案,因为这是重要的成本组成部分,我们会有有更详细介绍。在技术上,硅光子一个重要的论点为到下一代50G(50G-NRZ或100G-PAM4)外置调制器的性能要远优于直调激光器^[6-8]。这个结论被大多数人所认可,不过目前并

无定论是否直调激光的方案一定无法在下一代量产商用。

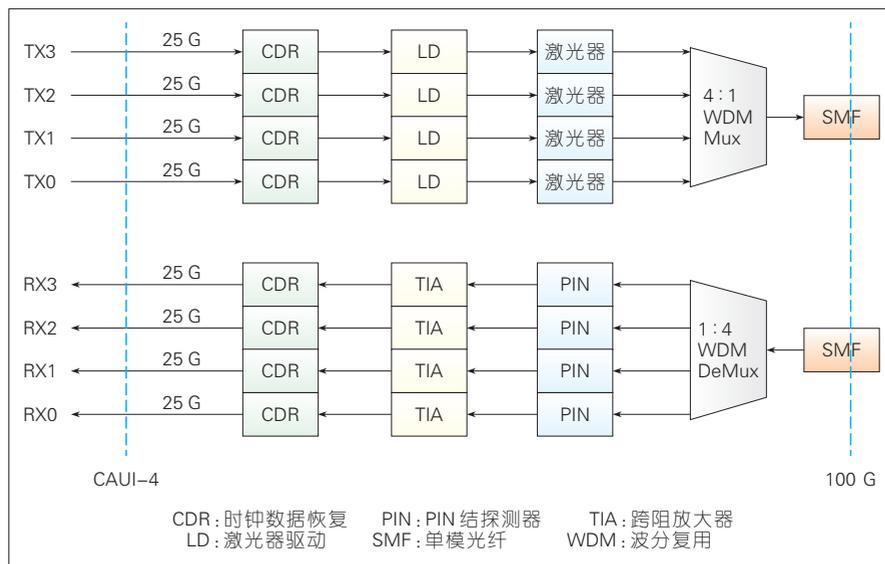
2.2 CWDM的方案

图2描述了100G CWDM4典型的InP方案,和PSM4相比,该方案中使用了4个不同波长并通过Mux/DeMux使用同一根光纤收发所有波长。图中没有画出相应的硅光方案是因为:一方面由于容易想象在类似于PSM的情况下,使用集成的调制器和直流激光器代替高速激光器,并集成PD的情况;另一方面是对于Mux/DeMux的处理存在不同的方案。目前,在该应用的市场基本仍由全InP的方案所占有,一方面该应用的硅光方案并不能如PSM那样使用一个激光器,因此在组件成本方面没有明显优势;另一方面耦合4个激光器进入硅光芯片对封装提出了很大的挑战。而Intel采用的源于UCSB的InP-Si异质混合集成技术在封装方面则有很大优势,因为基于InP的激光器材料是使用die-to-wafer bonding,在后端工艺前集成在硅光wafer上的,解决了后面耦合的问题。该技术也有明显的缺点:一方面破坏了硅光的互补金属氧化物半导体(CMOS)材料兼容性使得Foundry生产的可能性非常低(Intel使用自己的专用fab产线),另一方面该设计从理论上便无法达到独立激光器的效率,降低了整体性能^[9]。

能够集成Mux/DeMux在硅PIC上是硅光方案的一个重要的优点,但目前为止由于工艺和需热调的一些原因在产品化上并不是十分顺利。不过,这个应用是各硅光子产品在未来几年力争进入甚至主导的市场。

2.3 光源的耦合

对于除Intel方案外的硅光子数通产品方案,耦合直流激光器是一个实现困难但又必须的部分。硅光芯片上常见的耦合原理为在芯片边缘波导截面的边耦合和使用光栅耦合



▲图2 100G CWDM4 示意

的表面耦合。前者常用于和光纤的耦合,为光纤块(有时加上透镜)的有源对准。在用于和激光器的耦合时,一般采用无源的 flip-chip 方式,把激光器裸芯片直接倒装在硅光芯片上,通过不同的耦合和辅助结构来尽量减少位置误差。目前 Mellanox 和 MACOM 采用该方案,前者有一定的量产。光栅耦合方式对准容差较大,但该方案需要比较复杂的基于硅光平台的激光微封装,Luxtera 目前采用该方案用于量产。光源的耦合是硅光一个重大的问题,学术界仍针对各种单片集成方案继续研究,工业界则试图通过各种方案降低封装的复杂度、提高自动化和耦合效率。

3 硅光子在电信传输网的应用

光传输网(OTN)是以波分复用技术为基础,在光层组织网络的骨干传送网。大容量、长距离的传输能力是光传送网络的基本特征。随着传送网客户信号带宽需求的不断增加,光传送网络需不断采用革新的传输技术提升传输能力。目前主要采用带外前向纠错(FEC)、新型调制编码(强度和相位结合调制、偏振复用、相干接收)结合色散光域可调补偿、电

域均衡等技术增加 OTN 网络在高速(40 Gbit/s 以上)大容量配置下的组网距离。光传输网产品因为速率及传输距离要求高,通常光器件价格较高,对成本上没有 PON 及数据中心应用那么敏感。随着带宽需求的不断增加,对光器件集成度、尺寸、功耗提出了越来越高的要求^[10-11]。

3.1 相干接收

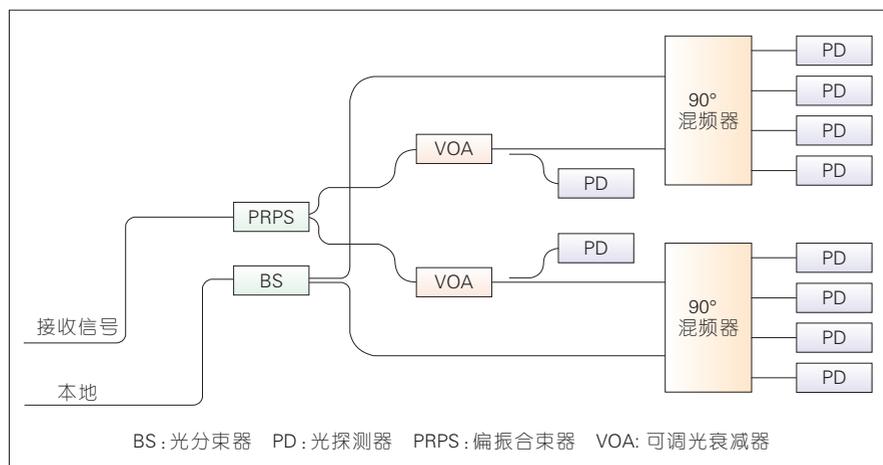
相干光接收机是 100 G / 200 G / 400 G 光模块中的核心部件,其结构如图 3 所示。硅基相干光接收器件主要由功率检测 PD、高速 PD、90°混频器、偏振合束器(PRPS)、光分束器

(BS)、VOA 组成。信号光耦合至芯片后,经过 PRPS,将横电波模式(TE)与横磁波模式(TM)分离,并且 TM 模转换为 TE 模。经过 VOA,分别进入两个 90°混频器,与本振光进行混频。在 VOA 后放置的功率检测 PD 可以进入 90°混频器的光功率,用于调控 VOA 以保持两个偏振态的信号强度相等。信号光与本振光经过混频后,被 PD 接收,转化为电信号,进行平衡接收。其关键技术点包括:

(1)采用硅基异质外延的锗进行光探测器的集成。采用硅基异质外延的锗进行 PD 的集成,可以充分发挥光子集成的优势,大大提高器件的集成度,且避免了封装时将探测器与光芯片耦合的步骤,提高器件的可靠性和可生产性。面对更高密度、更高速率的通信要求,硅基异质外延的锗探测器是最有前景的解决方案。

(2)硅基 90°混频器集成。相干接收需要本振光与信号光以特定的相位差混频产生拍信号,混频中功率分配的一致性和相位差的准确性直接影响接收性能。相对于传统的分离器件的解决方案,将 90°混频器集成在硅芯片上,可以有效地减少器件的尺寸,大大减少耦合对准的复杂性,降低器件间的串扰以及耦合带来的插损。

(3)硅基偏振转换和分离器集成。由于光通信中对信息密度的要



▲图3 硅基相干光接收机结构示意图

求,为了有效利用有限的带宽,往往采用偏振复用的方式,偏振合束器在这里起到关键作用。在传统的相干接收中,往往采用分离器件或者空间光学的方法实现。由于硅材料本身是各向同性的材料,有别于传统的用于偏振转换的各向异性材料,硅基的偏振转换与分离需要精巧的设计来完成。

3.2 相干调制器

高阶调制格式是实现超高速大容量光信号长距传输的主要技术手段之一。在长距离相干光模块中四相相对相移键控(DQPSK)的调制方式已经得到商用,在超 100 G 相干光传输中,16 正交振幅调制(QAM),以及更高阶 QAM 的调制方式也已进入了比较成熟的研究阶段。

图 4 为硅基相干调制器的结构示意图。相干调制器主要由 BS、MZM、PRPS 以及功率监测 PD 组成。发射一侧的本振光经过 3 级 1×2 的光分束器进入 4 个 MZI 高速光调制器中,在加载由 DSP 输出的电调制信号后,通过调整 4 个 MZM 的相对工作状态并由偏振合束器输出,形成 DQPSK/16AQM 的光调制信号。功率监测 PD

用于及时反馈每个调制器的不同工作状态。

相干调制器的技术难点在于优化各项参数,实现光与微波信号的速度匹配,共面波导电极的阻抗匹配及微波信号的低损耗传输,有效提升光调制的带宽特性和改善高速信号的完整性问题,并降低由调制效率和带宽的 trade-off 所带来的限制,从而在同样的频率范围内,获得更高的调制效率,减小因调制不足导致的插入损耗及驱动电压。

4 其他应用场景

除了上面两个方向外,硅光子在其他光通信领域也有应用。目前成功量产的典型是 Inphi 为 Microsoft 的数据中心互联(DCI)应用定制的 ColorZ 产品。由于是新兴的产品定义(非传统 DCI),Inphi 有很大的自由度设计自己的产品,采用了 2 个波长和 50 G-PAM4 以达到单一模块 100 G 的长距(上至 80 km)传输。这个产品有其独特性,需要客户在传统的电信通信解决方案上做出修改,从系统级开始定制,适合 Microsoft、Google 这类自身有很强系统经验和团队的客户。2017 年 OFC 期间 Inphi 宣布对其他客

户开放这个方案,未来也许会看到这个方案和其他类似的方案在不同客户和场景下取得应用。

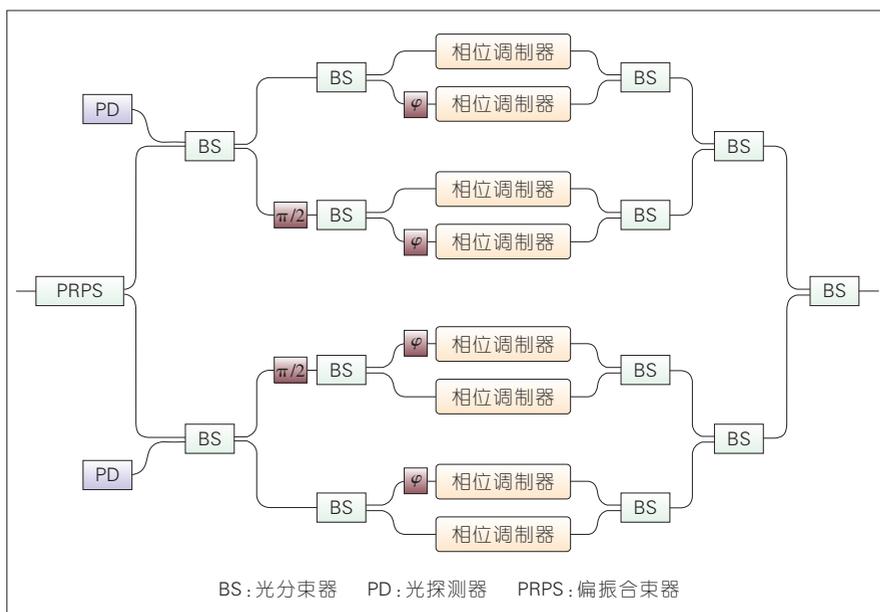
此外,基于硅光外腔的可调谐激光器也是近年来一些公司非常希望实现产品化的方向:一方面希望基于硅光外腔的可调谐激光器能够成为实现低成本 WDM-PON 的关键技术,另一方面如果能可靠实现窄线宽和高输出功率(~ 100 kHz, >13 dBm),则可能替代相干通信中 iTLA 类可调谐激光器,向低成本和进一步小型化的方向发展。在这类设计中,一般利用游标效应在硅光芯片上通过两个自由光谱范围(FSR)略有不同的谐振腔在比较宽的范围内调节激光波长,对于窄线宽可能还需要滤波器之类结构,具体的设计各有不同。一个主要的难点是:增益芯片和硅光外腔芯片的耦合,这个耦合的损耗和界面反射对整体激光器的性能影响很大,且有可靠性的考虑,要求非常高。目前该方案还没有看到量产的产品。

5 结束语

硅光子技术在商业化进程上相比于很多新技术有很大的不同,工业界从很早便开始大力投入这个领域,并在很多时候比学术界走得更快。文章中,我们试图通过回顾硅光子技术和商业化发展的历史,来分析这个现象并希望继续或准备开发或使用硅光子技术的工业界成员有一些提示。我们认为硅半导体生态系统是硅光子最大的凭借,很多技术开发和商业模式的决策应从这个角度出发。这个观点在文中列举的目前取得成功的几个硅光子产品方向上得到一定印证。文章中,我们还对不同的硅光子方案的优缺点进行了分析,并对产品化中重点的努力方向做了一些描述。

参考文献

- [1] SOREF R, LARENZO J. All-Silicon Active and Passive Guided-Wave Components for $\lambda = 1.3$ and $1.6 \mu\text{m}$ [J]. IEEE Journal of



▲ 图 4 硅基相干调制器结构示意图

➡ 下转第 14 页

硅光子芯片工艺与设计的发展与挑战

The Progress and Challenges of Silicon Photonics Process and Design

郭进/GUO Jin
冯俊波/FENG Junbo
曹国威/CAO Guowei

(中国电子科技集团公司第三十八研究所,
安徽合肥 230088)
(CETC38, Hefei 230088, China)

硅光子集成技术,是以硅和硅基衬底材料(如 SiGe/Si、SOI 等)作为光学介质,通过互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容的集成电路工艺制造相应的光子器件和光电器件(包括硅基发光器件、调制器、探测器、光波导器件等),并利用这些器件对光子进行发射、传输、检测和处理,以实现其在光通信、光互连、光计算等领域的实际应用。硅光子技术结合了以微电子为代表的集成电路技术的超大规模、超高精度的特性和光子技术超高速率、超低功耗的优势。在过去几十年里,作为现代集成电路产业基石的 CMOS 工艺取得了令人瞩目的发展。

而硅光子集成技术作为依存在 CMOS 工艺之上的一个新兴技术方向,从设计方法、设计工具和流程、基于工艺平台的协同设计等方面很大程度上参考和借鉴了微电子对应的内容。特别是最近几年,硅光子单芯片集成也像集成电路领域经典的摩

收稿日期: 2017-08-04

网络出版日期: 2017-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(61475144); 科技部国际合作项目(2015DFE12910); 安徽省科技攻关计划项目(1604a0902123)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0007-004

摘要: 针对硅光子器件的特殊性提出了与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容的硅光工艺开发的基本原则和关键问题。相比于工艺,硅光在芯片设计的方法和流程方面面临更多的挑战,例如硅光子技术与 CMOS 工艺兼容性,可重复 IP 制定及复杂芯片的快速设计等。故充分利用先进的半导体设备和工艺、个别工艺的特殊控制、多层次光电联合仿真等是硅光子芯片从小规模设计走向大规模集成应用的关键。光子链路的仿真、器件行为级模型、版图的布局布线及验证等是硅光芯片走向成熟的关键。

关键词: 硅基光子学; 设计方法; 设计流程; 大规模集成

Abstract: In this paper, the fundamental principles and key issues of the silicon optical process compatible with complementary metal oxide semiconductor(CMOS) are described. Silicon optics faces many challenges in terms of chip design methods and processes, including the process compatibility of CMOS and silicon photonics, the design of repeatable IP and the quick design of complicate chips. To achieve the change from small scale design to the large scale integrated application, some issues should be emphasized, including the full use of the advanced semi-conductor equipment and process, the control of some special processes and the simulation and design of opto-electronics devices. And the optical link simulation, behavior level model, floor planning, placement and routing, and the layout verification are the key factors to the maturity of silicon optical chip.

Keywords: silicon photonics; design methodology; design flow; large scale integration

尔定律描述的那样,每隔一段时间集成的器件数量翻番,从而能在相同面积的芯片上实现更多的功能^[1]。很多 CMOS 晶圆厂及中试平台不断采用更先进的工艺进行硅光芯片及硅光芯片与电芯片的集成研究^[2-3],这为硅光芯片打开了大规模集成应用的大门。硅光芯片的设计者能比较便利地享受晶圆厂成熟工艺的流片服务,这是硅光芯片能实现广泛商业化的前提之一。另外一个前提是:类比集成电路领域,需要有一套固化的设计流程,以得到更加完善的电子设计自动化(EDA)工具的支持和基于单元

器件库的设计方法。

1 硅光工艺的开发

1.1 硅光子的特殊性

硅光子和微电子都是基于硅材料的半导体工艺,因此将集成光子工业基于微电子工业之上,使用硅晶作为集成光学的制造平台将是硅光子工艺平台的最佳选择。这将使全球历时 50 年、投入数千亿美元打造的微电子芯片制造基础设施可以顺利地进入集成光器件市场,将成熟、发达的半导体集成电路工艺应用到集

成光器件上来,集成光学的工业水平会得到极大提高,这正是目前发展良好的硅光子技术的发展思路。

然而,硅光子相对于微电子工艺有其特殊性,不作修改的微电子工艺平台无法制备出高性能的硅光子器件。因此 CMOS 只能提供硅基光电子加工设备,具体的工艺制备流程仍需开发。相对于微电子工艺,硅光子特殊性主要表现在以下几个方面:

(1) 总体路径。硅光子当前的发展水平相当于 20 世纪 80 年代初微电子的水平,自动化、系统化和规模化都远远不够。硅光子的发展也不是像微电子一样延续尺寸和节点减小的发展路径。目前硅光子的特征尺寸约为 500 nm,最小尺寸在 100 nm 左右,相对于微电子大得多,更小的工艺节点对硅光子器件本身没有像集成电路等比缩小这样有特别大的意义,当然更小工艺节点的半导体设备对工艺控制得更好,能在一致性、重复性和成品率等方面体现优势。

(2) 版图特点。硅光子器件尺寸差别大,尤其存在许多不规则结构,如图 1 所示,这在微电子版图里是基本没有的。另一方面,硅光子器件的特征尺寸(~500 nm)并不是最小尺寸(~100 nm),这和集成电路是不同的。工艺过程中往往既需要对最小尺寸进行控制,又更需要对特征尺寸进行控制,也对工艺监测和优化提出了更高的要求。

(3) 工艺特殊性。硅光子材料相对于可编程逻辑控制器(PLC)和钢磷(InP)等材料体系具有更大的折射率差,因此波导尺寸可以非常小,如图 2 所示。

然而,其带来的缺点是硅光子器件对尺寸和工艺误差非常敏感,1 nm 的工艺误差足以对硅光子器件性能带来明显的影响,因此硅光子工艺需要严格的尺寸精度控制。除了尺寸精度控制,硅光子器件侧壁粗糙度也对波导损耗带来巨大影响,必须对制备工艺进行优化。理论和实验数据

表明:2 nm 的侧壁粗糙度将可以带来 2~3 dB/cm 的波导传输损耗^[4]。

(4) 材料特殊性。从光电子材料本身的特性来看,硅材料并不是最好的选择。由于不是直接间隙半导体材料,硅基发光一直是一个巨大的难题。硅没有一阶线性电光效应,因此也不是最佳的调制器材料。而且,硅对 1.1 μm 以上波长透明,无法作为通信波段光探测器材料。为了实现硅基器件性能的突破,以硅材料为基底引入多材料是硅光子的必然选择。如硅基引入 Ge 材料制作 GeSi 探测器已成为一项标准工艺,需要解决外延生长过程中大的晶格失配,Kimerling 教授研究小组通过高低温两步生长工艺较好地解决了该问题^[5]。

1.2 基于 CMOS 的硅光子工艺的开发

硅光子典型器件如图 3 所示。

硅光子器件尺寸跨度从几十微米到约 100 nm,特征波导的尺寸为 500 nm 左右,合适的工艺节点大概为 0.13 μm 及以下。比利时 IMEC、新加坡 IME、美国 AIM Photonics 都是采用

200 mm、0.13 μm 来加工硅基光电子器件。

微电子工艺已经有超过 50 年的发展和积累,基于标准 CMOS 工艺开发硅光子工艺将是一种最优选和最经济的方法。在工艺开发过程中需遵循以下基本原则:

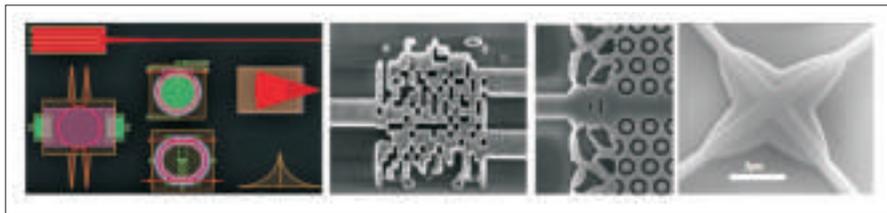
(1) 温度预算。新增或修改的工艺温度一定要符合整个工艺流程,如:超过 400℃ 的工艺不能放在后端工艺。

(2) 污染控制。可能引入交叉污染的工艺必须放在污染敏感的工艺后面。

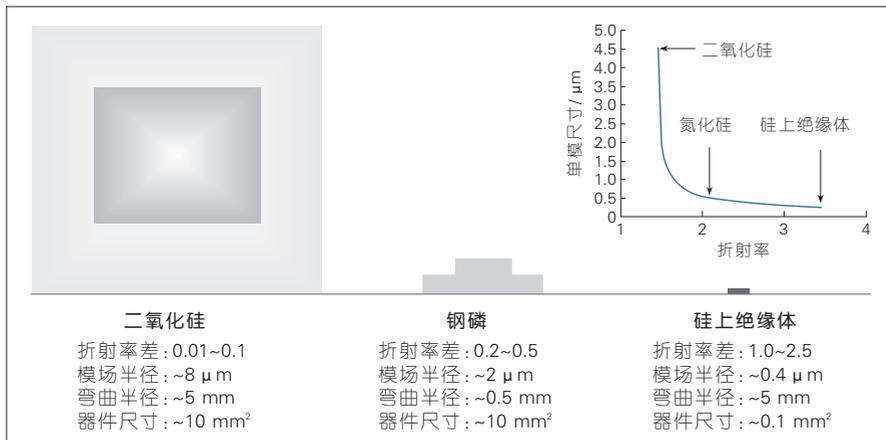
(3) 关键工艺。保证关键工艺性能,如:最关键的硅波导光刻工艺尽量在平整表面进行。

(4) 减少修改。尽量减少对标准 CMOS 工艺的修改也是工艺流程优化需要考虑的一个重要方面。

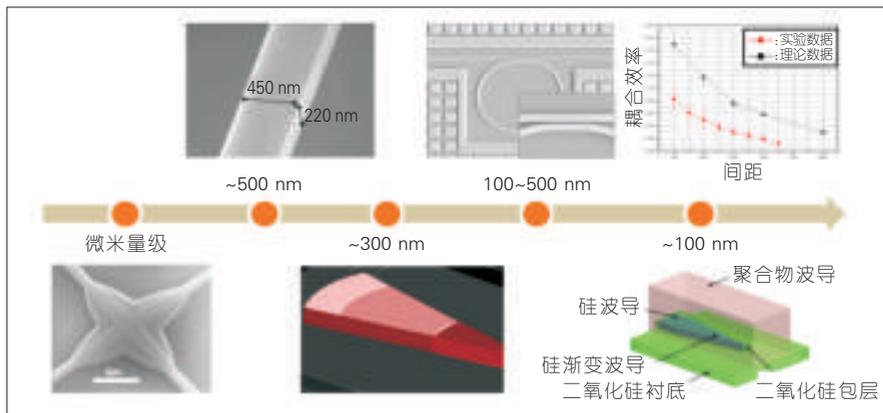
图 4 显示了从标准 CMOS 工艺到硅光子工艺流程的过程,至少需要对标准 CMOS 工艺增加 3 个工艺模块:部分刻蚀、Ge 外延生长和光窗成型,同时需要针对硅光子器件进行大量



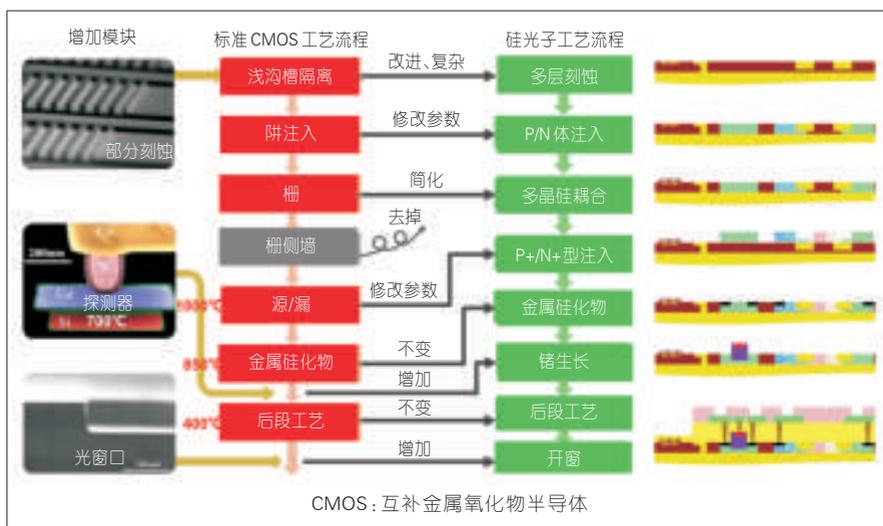
▲ 图 1 硅光子不规则版图结构示例



▲ 图 2 PLC、InP、SOI 波导折射率差和尺寸对比



▲图3 硅光子器件典型尺寸



▲图4 基于标准CMOS工艺的硅光子工艺流程开发

的工艺参数优化设计,如:第6步的硅掺杂对调制器的设计非常关键,掺杂浓度、形貌需要针对硅光子器件进行优化。

2 硅光芯片设计流程及挑战

硅基光电子作为基于CMOS工艺的新兴方向,直接受益于微电子行业几十年发展的积淀。CMOS平台所能提供的强大工艺能力,使大规模集成硅光子器件成为可能^[6-7],这是其他光子集成方向所无法比拟的。如何利用现有成熟工艺,也是硅基光电子设计工程师所面临的巨大挑战。目前,硅光子的设计方法和设计工具,多效仿或来自于微电子领域的电子设计自动化(EDA)。EDA对系统功能的

实现多通过已验证元件的组合,这些元件一般包含于工艺厂提供的工艺设计包(PDK)。目前在一些硅光子多项目晶圆(MPW)流片中,工艺厂已经开始提供PDK用于硅光子领域的设计^[7],但是功能仍十分有限。另一方面,硅光子设计有其独特的需求,EDA工具无法满足其自动化设计需求,亟需针对硅光子设计的硅光子设计自动化(PDA)工具^[8]。

图5展示了现阶段的硅光子设计流程^[6],类似于EDA的流程,硅光子设计也是从系统功能需求出发。基于功能分析和分解,设计出光子链路,并仿真获得其可实现的功能性参数;进一步地,通过物理仿真与优化,获得组成光子链路的器件结构及布

图设计;然后基于器件的物理模型,分析链路集成中的寄生效应并验证链路功能性,修正设计其结构参数。

在整个硅光子设计流程中,目前仍面临着诸多挑战。光子链路的仿真便是其中之一。相比于其他的光子仿真工具,链路的仿真工具出现较晚^[9],仿真方法一般是利用散射矩阵的形式来描述链路中光子器件及其之间的连接;但是由于光子器件本身的结构复杂性,很难使用单一的散射矩阵来描述其属性。另一方面,现在的工艺已经可以实现单片数以千计的无源有源器件混合集成,相互之间带来的寄生效应更难以用单一矩阵形式描述,更不用说光电集成时所面临的光电混合仿真。

要实现准确的光子链路仿真,其根本在于构建精确的基础光子器件的行为模型,这也是硅基光电子设计目前面临的另一个挑战。在硅基光电子发展的前10年里,大量的工作集中于光子器件的物理仿真,以构建用于光子链路的器件模型;但是受制于光子器件模型的复杂性,以及其功能特性对模型结构精确度的敏感性,很难从物理模型中提取器件的行为模型,这也导致了光子链路仿真的不确定性,使得设计流程经常需要在链路仿真与器件优化之间做更多次的设计迭代。另一方面,大多数的硅基光电子器件均是波长依赖型的,并且严重依赖于材料的温度特性及其他物理效应,这使得器件模型中所描述的功能特性仅在特定环境条件下才是可信的,一旦环境条件改变,额外的仿真与优化就必不可少。当然,进一步完备器件模型,是解决该问题的一个方法,另外还可以根据工作条件,由设计工具自动地完成环境设置及器件的额外仿真优化,这是设计工具的一个发展趋势,不过目前仅有少数工具可以有限地实现该功能^[10-11]。

硅光子链路设计与器件设计完成后需要生成掩模版图,用于提交给工艺厂进行制备。布图的生成一般仍由

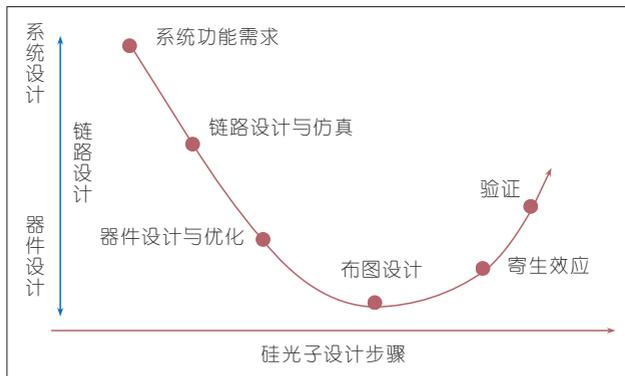


图5
硅光子设计流程

立于链路设计,而且多沿用EDA中使用的工具。与电路版图多是横平竖直的矩形结构不同,硅光子链路及器件的结构需要考虑导波的需求,尤其在转弯连接处大多需要采用曲线构型,从而使硅光子的版图更加复杂。另外,由于硅光子波导的制备一般仅使用一层硅材料,这样复杂结构的波导就需要采用不同深度的刻蚀工艺来实现,考虑波导器件性能对结构尺寸的敏感性,实际制备时需要非常精准的套刻工艺。而对于单次刻蚀工艺来讲,由于硅光子器件的复杂结构,在同一掩模中,会出现尺寸跨度较大的不同结构,使得单步工艺中需要兼顾各异的刻蚀结构,这几乎是不可能通过工艺调整来实现的,只能利用布图的优化与修正来实现。

布图中另一个难点是布局与布线(P&R)。对硅光子器件来讲,要面临比电子器件布局中更多的限制,比如转弯半径、波导间距等,以避免不必要的损耗和耦合。而器件的连接则要考虑器件端口结构与连接波导类型、角度的匹配,对于相位敏感的链路结构,还需要精确控制不同链路中的连接波导长度。

在送交版图到工艺厂加工之前,验证工作也是必不可少的。目前用于硅光子的验证工具多直接来源于EDA工具的定制,仅能实现设计规则检查(DRC)。由于光电器件之间的诸多差异,DRC的实现也是十分有限的,例如版图中常出现的曲线结构,现有的DRC工具几乎无能为力。另

一项更大的挑战来自于版图和电路图的对比验证(LVS),由于从硅光子版图中提取链路模型非常困难,目前仍没有专门的工具来实现。不过,将硅光子设计流程集成于统一的开发环境,是实现该功能的可行途径。

3 结束语

硅光子集成的工艺开发路线和目标比较明确,困难之处在于如何做到与CMOS工艺的最大限度的兼容,从而充分利用先进的半导体设备和工艺,同时需要关注个别工艺的特殊控制。硅光子芯片的设计目前还未形成有效的系统性的方法,设计流程没有固化,辅助设计工具不完善,但基于PDK标准器件库的设计方法正在逐步形成。如何进行多层次光电联合仿真,如何与集成电路设计一样基于可重复IP进行复杂芯片的快速设计等问题是硅光子芯片从小规模设计走向大规模集成应用的关键。

参考文献

- [1] HECHT J. Silicon Photonics Evolve to Meet Real-World Requirements [J]. Laser Focus World, 2013, 49(7):51-53
- [2] LIM A E J, SONG J. Review of Silicon Photonics Foundry Efforts [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(4): 405-416. DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2293274
- [3] POLSTER R, THONNART Y. Efficiency Optimization of Silicon Photonic Links in 65-nm CMOS and 28-nm FDSOI Technology Nodes [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2016, 24(12): 3450-3459. DOI: 10.1109/TVLSI.2016.2553673
- [4] BAUDOT C, SZELAG B. Progresses in 300mm DUV Photolithography for the

- Development of Advanced Silicon Photonic Devices[C]//Proceeding of 2015 SPIE Advanced Lithography. USA: SPIE, 2015: 94260D-94262D. DOI:10.1117/12.2085800
- [5] LUAN H C, LIM D R. High-Quality Ge Epilayers on Si with Low Threading-Dislocation Densities [J]. Applied physics letters, 1999, 75(19): 2909-2911
 - [6] SOREF R. The Past Present and Future of Silicon Photonics [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(6):1678-1687. DOI: 10.1109/JSTQE.2006.883151
 - [7] MUNOZ P. Evolution of Fabless Generic Photonic Integration[C]// Transparent Optical Networks (ICTON), 2013 15th International Conference on. USA:IEEE, 2013: 1-3. DOI: 10.1109/ICTON.2013.6602975
 - [8] BOGAERTS W, FIERS M. Design Challenges in Silicon Photonics [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(4): 1-8. DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2295882
 - [9] FIERS M, VAN V T. Time-Domain and Frequency-Domain Modeling of Nonlinear Optical Components at the Circuit-Level Using a Node-Based Approach[J]. JOSA B, 2012, 29(5): 896-900
 - [10] FIER M, LAMBERT E. Improving the Design Cycle for Nanophotonic Components[J]. Journal of Computational Science, 2013, 4(5): 313-324. DOI: 10.1016/j.jocs.2013.05.008
 - [11] ARELLANO C, MINGALEEV S. Efficient Design of Photonic Integrated Circuits (PICS) by Combining Device- and Circuit-Level Simulation Tools[J]. SPIE OPTO, 2013: 862711-862712

作者简介



郭进, 中国电子科技集团公司第三十八研究所高级工程师;主要研究领域为CMOS工艺兼容的硅光子集成技术;先后参加欧盟第6框架和第7框架下的光子集成项目,主持和参加基金项目10余项;已发表论文10余篇。



冯俊波, 中国电子科技集团公司第三十八研究所高级工程师;主要研究领域为硅基光电子器件与集成技术;作为项目负责人主持了国家和省部级项目共5项;已在知名杂志上发表论文30余篇,拥有专利10余项,参与合著《硅基光子学》。



曹国威, 中国电子科技集团公司第三十八研究所高级工程师;主要研究方向为硅光器件自动化设计,目前主要负责硅光平台PDK的开发,以及多项目晶圆流片业务技术支持。

基于复模式匹配的半矢量硅基光波导模式求解方法

Two-Dimensional Semi-Vectorial Silicon Optical Waveguide Mode Solver Based on Complex Mode-Matching-Method

赵佳/ZHAO Jia
韩林/HAN Lin
黄卫平/HUANG Weiping

(山东大学, 山东 济南 250100)
(Shandong University, Jinan 250100, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0011-004

摘要: 提出了一种基于半矢量复模式匹配方法的类矩形波导模式求解方法, 利用一维复模式求解和复模式匹配方法, 求解包括矩形波导在内的任何类矩形波导的电磁场分布和有效折射率。首先在波导一个维度进行差分离散, 得到一维复模式分布, 在另一个维度利用波导的边界条件和电磁场在波导内的奇偶分布特性得到解析关系, 最后通过求解特征矩阵得到类矩形波导中电磁场的分布。与传统方法相比, 利用复模式匹配方法求解类矩形波导中的模场具有计算精度高, 适用范围广等优点。

关键词: 矩形波导; 复模式匹配; 半矢量

Abstract: In this paper, a new two dimensional rectangle-like waveguide mode based on semi-vectorial complex mode-matching-method is proposed. Utilizing one-dimensional complex modes and complex mode-matching method, the electromagnetic field distribution and effective index of waveguide modes can be obtained. The one-dimensional mode distribution can be obtained by using difference discrete in one dimension of the waveguide and the analytic relationship of the other dimension can be solved by using the boundary condition and parity distribution characteristic of the electromagnetic field in the waveguide. The electromagnetic field can be derived by solving the eigenmatrix. Compared with the full vector method, the solution we proposed has the wide application and high accuracy.

Key words: wo-dimensional waveguide; complex mode-matching-method; semi-vector

硅基光电集成技术将光器件小型化并和微纳电子器件集成到同一硅衬底上, 形成一个完整的具有新型功能的新型大规模集成芯片^[1-3], 是光通信技术发展的趋势。受工艺条件限制, 硅基光波导通常采用类矩形的结构(条型波导、脊型波导等)^[4-5]。因此, 如何精确求解出波导中的模式, 利用模式分析方法研究硅基光电器件的光传输性能, 从而指导集成芯片的设计, 就变得尤为重要。常用的求解波导模式的方法包括: 有限差分法^[6]、有限元法^[7]等数值计算方法, 此类方法由于求解精度与网格尺寸有关, 导致在高精度情况下计算量较大。为简化波导分析过程, 我们利用一维平板波导的复模式分析方法和复模式匹配的方法^[8-9]建立了类矩形波导的半解析模式求解算法。将类矩形波导拆分, 如图1所示, 在横截面沿一个维度将波导拆分成几个均

匀的单元, 每个单元作为平面波导来处理, 求解每个单元利用完全匹配层(PML)和完美反射边界(PRB)截断的复模式分布^[10-12], 在界面处利用电磁场的连续性进行模式匹配, 得到另一维度下的解析关系, 从而求解出模场的分布和传播常数的大小。由于大尺寸硅基光波导中的横电波模式(TE)和横磁波模式(TM)的主要场分量 E_y 、 H_x 、 H_z 和 E_x 、 H_y 、 E_z 比其他场分量大几个数量级, 以下主要针对两种模

场(TE和TM)的主要场分量进行了分析(半矢量分析)。

1 一维平板模式

假设在一维平板波导中的传播方向为 u , 平板波导的折射率只在 y 方向变化, 结构沿 v 方向是均匀的。基于半矢量分析方法, 波导中只需考虑TE或TM分量, 下文中以TE的模式为例, TM模式分析方法与TE模式分析方法一致。

收稿日期: 2017-08-03
网络出版日期: 2017-09-04

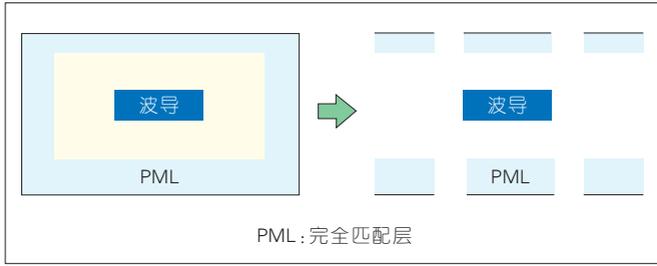


图1 矩形波导拆分成3个均匀的平板波导

TE 模的 3 个场分量可以表示成:

$$TE: \hat{H}_y = \frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{\partial \hat{E}_z}{\partial u} \hat{H}_u = -\frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{\partial \hat{E}_v}{\partial y} \hat{E}_v = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \left(\frac{\partial \hat{H}_u}{\partial y} - \frac{\partial \hat{H}_y}{\partial u} \right) \quad (1)$$

沿 y 方向, 波导被 PML 和 PRB 截断, 在 PRB 处的边界条件是电场为 0。一维电磁场分布可以由平板波导模式沿着 u 方向传输得到, 场的表达式为:

$$\hat{H}_y = H_y e^{-jk_x^TE u}, \hat{H}_u = H_u e^{-jk_x^TE u}, \hat{E}_v = E_v e^{-jk_x^TE u} \quad (2)$$

2 二维平面模式

在平板波导的坐标系下, 电磁场的传播方向为 u , 结构沿 v 向均匀, 折射率变化的方向为 y 方向。将几个平板波导在 xyz 坐标系下组合, 如图 2 所示, 电磁场可沿 xz 平面内的任意方向传播, 因此可将传播常数分解到 x 和 z 方向, 场分量分解到 xyz 坐标系中。

对于平板波导 TE 模来说, H_y 分量在坐标转换时保持不变, H_u 和 H_v 分解成 H_x 、 H_z 、 E_x 、 E_z , 这 5 个分量称为纵电 (LSE) 模。二维模式可以由许多 LSE 模式来组成, 这些 LSE 模式有同样的 z 向传播常数 β 。

沿 x 方向的 LSE 模为: 沿 x 正方向的传播常数为 $k_x^{TE} = \sqrt{(k_u^{TE})^2 - \beta^2}$, 其中

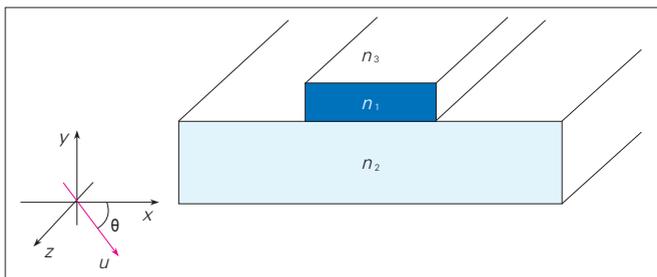


图2 两种坐标系下条波导的结构

β 有正的实部和负的虚部, 定义 $\sin \theta^{TE} = \frac{\beta}{k_u^{TE}}$, $\cos \theta^{TE} = \frac{k_x^{TE}}{k_u^{TE}}$ 。场分量可以表示成:

$$\begin{aligned} E_x^{TE} &= -E_v \sin \theta^{TE}, E_y^{TE} = 0, E_z^{TE} = E_v \cos \theta^{TE}, H_x^{TE} = H_u \cos \theta^{TE}, \\ H_y^{TE} &= H_y, H_z^{TE} = H_u \sin \theta^{TE} \end{aligned} \quad (3)$$

同上, 沿 x 负向传播常数为 $-k_x^{TE}$, 场分量为:

$$\begin{aligned} E_x^{TE} &= -E_v \sin \theta^{TE}, E_y^{TE} = 0, E_z^{TE} = -E_v \cos \theta^{TE}, H_x^{TE} = -H_u \cos \theta^{TE}, \\ H_y^{TE} &= H_y, H_z^{TE} = H_u \sin \theta^{TE} \end{aligned} \quad (4)$$

3 二维半矢量模式分解

在 x 方向上任意位置的半矢量模可以分解为 LSE 模。只考虑 TE 模式, 二维场分布可以表示为:

$$\begin{aligned} E_x(x, y) &= \sum_{p=1}^N -E_{v,p}(y) \sin \theta_p (c_p^+ e^{-jk_{v,p}x} + c_p^- e^{jk_{v,p}x}) \\ E_y(x, y) &= 0 \\ E_z(x, y) &= \sum_{p=1}^N E_{v,p}(y) \cos \theta_p (c_p^+ e^{-jk_{v,p}x} - c_p^- e^{jk_{v,p}x}) \\ H_x(x, y) &= \sum_{p=1}^N H_{u,p}(y) \cos \theta_p (c_p^+ e^{-jk_{v,p}x} - c_p^- e^{jk_{v,p}x}) \\ H_y(x, y) &= \sum_{p=1}^N H_{y,p}(y) (c_p^+ e^{-jk_{v,p}x} + c_p^- e^{jk_{v,p}x}) \\ H_z(x, y) &= \sum_{p=1}^N H_{u,p}(y) \sin \theta_p (c_p^+ e^{-jk_{v,p}x} + c_p^- e^{jk_{v,p}x}) \end{aligned} \quad (5)$$

假设 $C^\pm = c^\pm \pm c^\mp$, 式(5)写成:

$$\begin{aligned} E_x(x, y) &= \sum_{p=1}^N -E_{v,p}(y) \sin \theta_p (C_p^+ \cos k_{v,p}x - jC_p^- \sin k_{v,p}x) \\ E_y(x, y) &= 0 \\ E_z(x, y) &= \sum_{p=1}^N E_{v,p}(y) \cos \theta_p (-jC_p^+ \sin k_{v,p}x + C_p^- \cos k_{v,p}x) \\ H_x(x, y) &= \sum_{p=1}^N H_{u,p}(y) \cos \theta_p (-jC_p^+ \sin k_{v,p}x + C_p^- \cos k_{v,p}x) \\ H_y(x, y) &= \sum_{p=1}^N H_{y,p}(y) (C_p^+ \cos k_{v,p}x - jC_p^- \sin k_{v,p}x) \\ H_z(x, y) &= \sum_{p=1}^N H_{u,p}(y) \sin \theta_p (C_p^+ \cos k_{v,p}x - jC_p^- \sin k_{v,p}x) \end{aligned} \quad (6)$$

4 传输矩阵

在单元波导的边界处, 电场的切向分量和磁场的法向分量是连续的, 假设波导的边界在 $x=0$ 处, 如图 3 所示。界面处表达式如式(7):

$$\sum_{p=1}^N E_{v,p}^c \cos \theta_p^c C_p^{c-} = \sum_{p=1}^N E_{v,p}^s \cos \theta_p^s C_p^{s-} \quad (7)$$

$$\sum_{p=1}^N H_{u,p}^c \sin \theta_p^c C_p^{c+} = \sum_{p=1}^N H_{u,p}^s \sin \theta_p^s C_p^{s+} \quad (8)$$

式(7)两边同乘 $H_{y,q}^c$, 式(8)两边同乘 $E_{v,q}^c$, 可得到:

$$\int_{y_0}^{y_N} \begin{bmatrix} H_{y,1}^c E_{v,1}^c \cos \theta_1^c & L & H_{y,1}^c E_{v,1}^c \cos \theta_1^c & \begin{bmatrix} C_1^{c-} \\ M \\ C_N^{c-} \end{bmatrix} \\ M & O & M & \\ H_{y,N}^c E_{v,N}^c \cos \theta_N^c & L & H_{y,N}^c E_{v,N}^c \cos \theta_N^c & \begin{bmatrix} C_1^{c-} \\ M \\ C_N^{c-} \end{bmatrix} \end{bmatrix} = L_1 C^{c-} = R_1 C^{s-} \quad (9)$$

$$\int_{y_0}^{y_N} \begin{bmatrix} E_{v,1}^c H_{u,1}^c \cos \theta_1^c & L & E_{v,1}^c H_{u,1}^c \cos \theta_1^c & \begin{bmatrix} C_1^{c-} \\ M \\ C_N^{c-} \end{bmatrix} \\ M & O & M & \\ E_{v,N}^c H_{u,N}^c \cos \theta_N^c & L & E_{v,N}^c H_{u,N}^c \cos \theta_N^c & \begin{bmatrix} C_1^{c-} \\ M \\ C_N^{c-} \end{bmatrix} \end{bmatrix} = L_2 C^{c+} = R_2 C^{s+} \quad (10)$$

5 边界条件和传输谐振条件

5.1 $x=L$ 处的边界条件

在 PML 和 PRB 作为边界条件的

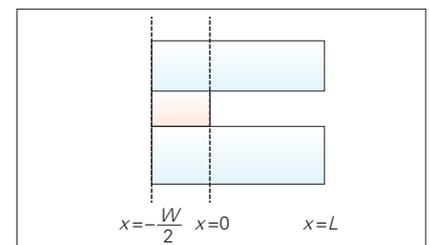


图3 条波导的截面

模型中,边界为 $x=L$ 。材料是均匀的,坐标拉伸后 L 变成一个复数。利用边界条件得到:

$$E_z(L,y) = \sum_{p=1}^N E_{\tau,p}^s(y) \cos \theta_p^s (-jC_p^{s+} \sin k_{x,p}^s L + C_p^{s-} \cos k_{x,p}^s L) = 0$$

或

$$C_p^{s-} = j \tan(k_{x,p}^s L) C_p^{s+} \quad p=1,2,\dots,N$$

假设

$$\text{Tan}_s = \text{diag}\{j \tan(k_{x,p}^s L)\} \quad p=1,2,\dots,N$$

$$C^{s-} = \text{Tan}_s C^{s+} \quad (11)$$

5.2 $x=-W/2$ 处的边界条件

(1) 奇模

如图3所示对称结构,如果 $x=-W/2$ 处的电场为零,也就是 $E_x=E_z=0$,边界条件为:

$$E_z(-\frac{W}{2},y) = \sum_{p=1}^N E_{\tau,p}^c(y) \cos \theta_p^c (jC_p^{c+} \sin k_{x,p}^c \frac{W}{2} + C_p^{c-} \cos k_{x,p}^c \frac{W}{2}) = 0$$

或

$$C_p^{c-} = -j \tan(k_{x,p}^c \frac{W}{2}) C_p^{c+} \quad p=1,2,\dots,N$$

假设

$$\text{Tan}_c = \text{diag}\{-j \tan(k_{x,p}^c \frac{W}{2})\} \quad p=1,2,\dots,N$$

(2) 偶模

如果在 $x=-W/2$ 处的磁场为0,波导的模式为偶模,边界条件为:

$$H_z(-\frac{W}{2},y) = \sum_{p=1}^N H_{\tau,p}^c(y) \cos \theta_p^c (C_p^{c+} \cos k_{x,p}^c \frac{W}{2} + jC_p^{c-} \sin k_{x,p}^c \frac{W}{2}) = 0$$

或

$$C_p^{c-} = j \cot(k_{x,p}^c \frac{W}{2}) C_p^{c+} \quad p=1,2,\dots,N$$

假设

$$\text{Tan}_c = \text{diag}\{j \cot(k_{x,p}^c \frac{W}{2})\} \quad p=1,2,\dots,N$$

因此不论是奇模还是偶模,都可以写成:

$$C^{c-} = \text{Tan}_c C^{c+} \quad (12)$$

5.3 传输谐振条件

综合式(9)、(10)、(12),可得到传输谐振条件:

$$(R_1 \text{Tan}_s)^{-1} (L_1 \text{Tan}_c) - R_2^{-1} L_2) C^{c+} = 0$$

或 $F(\beta) \cdot C^+ = 0$

这是一个本征值问题,在传播常数 β 处矩阵 F 的值为0,可得到场分布系数 C 矩阵。

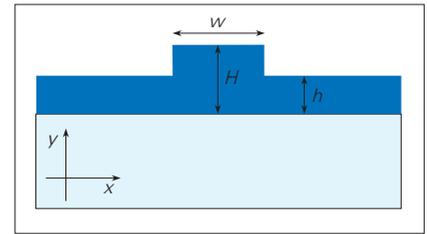
6 脊波导模式计算

为进一步验证半矢量模式匹配方法解模的精确性,这里以硅光子平台常用的脊型波导为例进行对比计算。如图4所示,脊型波导的上包层材料为空气,中间芯层材料为硅(折射率为3.47),下衬底为二氧化硅(折射率为1.44)。脊型波导中间高度 H 为 $0.6 \mu\text{m}$,两边平板的高度 h 为 $0.4 \mu\text{m}$,脊的宽度 W 为 $0.8 \mu\text{m}$ 。进行计算的窗口大小为 $3.6 \mu\text{m} \times 2.8 \mu\text{m}$,PML的厚度为 $500 \sim 10i \text{ nm}$ 。计算波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 。计算得到的各个场分量如图5所示。

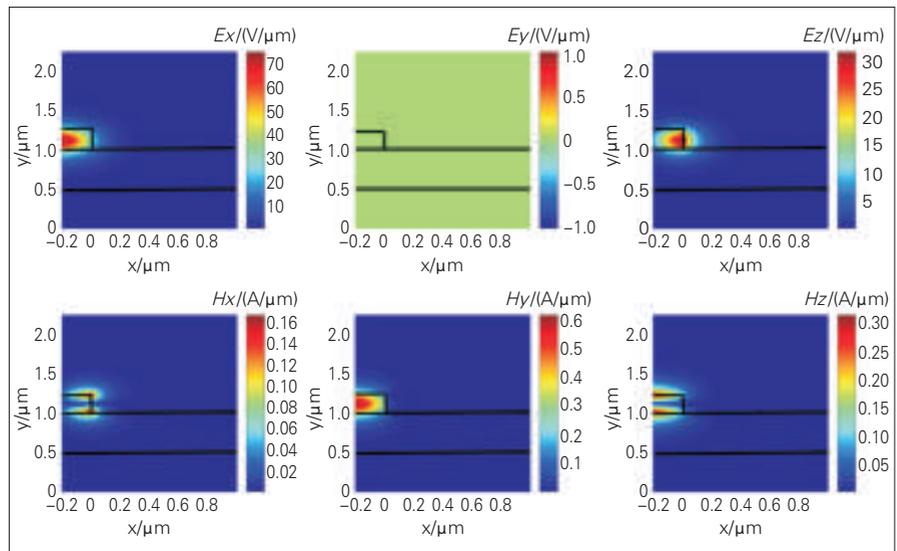
将半矢量结果与数值计算结果进行了比较。定义折射率的相对误差为:

$$\frac{(n_{\text{eff,semi_vector}} - n_{\text{eff}})}{n_{\text{eff}}} \quad (12)$$

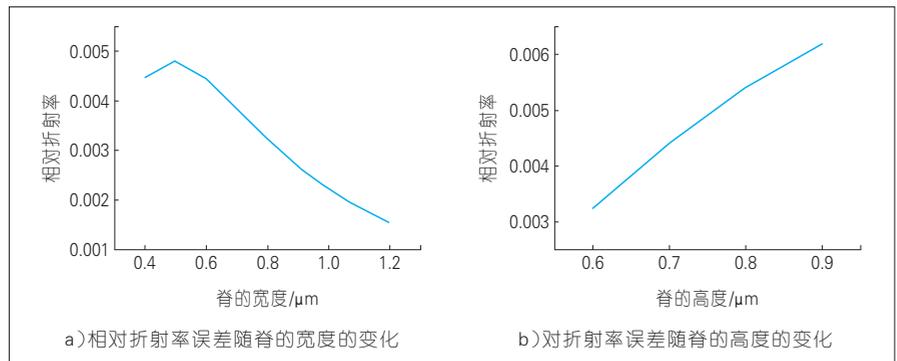
如图6所示,随着脊的宽度增加,脊波导中的传输模式更接近纯TE或TM模式,计算误差会降低。随



▲图4 脊波导的横截面 ($H=0.6 \mu\text{m}$, $h=0.4 \mu\text{m}$, $W=0.8 \mu\text{m}$)



▲图5 脊波导TE₀各分量的场分布



▲图6 相对折射率误差的变化

着脊的高度增加,波导中的传播模式不再是纯 TE 或 TM 模,计算误差将会增大。

7 结束语

文章中,我们提出了一种新的精确求解大截面波导模式的方法,相比波脊波导解模的经验公式,精度大大提高;相比数值计算方法不需要进行网格剖分和迭代计算,仅需要进行传输矩阵运算,内存占用少,计算量小;相比全矢量模式解模算法复杂度降低,在波导截面相对较大(纯 TE 或 TM 模)情况下,精度和全矢量相当。因此在大截面波导器件设计过程中,用半矢量的解模算法替代传统模式求解算法,在相同精度下可得到更快的计算速度。

致谢

本研究得到 McMaster 大学梁海波博士和山东大学孙崇磊博士的帮助,在此表示感谢。

参考文献

- [1] SUN C, WADE MT, LEE Y, et al. Single-Chip Microprocessor that Communicates Directly Using Light[J]. Nature, 2015,528(7583): 534-538. DOI:10.1038/nature16454
- [2] HUANG Y, SONG J F, LUO X S. CMOS Compatible Monolithic Multi-Layer Si3N4-on-SOI Platform for LowLoss High

- Performance Silicon Photonics Dense Integration[EB/OL].(2014-09-02)[2017-08-02].http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=oe-22-18-21859
- [3] HECK M J R, BOUTERS J F, DEVENPORT M L. Hybrid Silicon Photonic Integrated Circuit Technology[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 6100117-6100117. DOI: 10.1109/JSTQE.2012.2235413
- [4] FISCHER U, ZINKE T, KROPP J R, F, et al. 0.1 dB/cm Waveguide Losses in Single-Mode SOI Rib Waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters,2996,8(5): 647-648. DOI: 10.1109/68.491567
- [5] RICKMAN A G, REED G T, NAMAVAR F. Silicon-on-Insulator Optical Rib Waveguide Loss and Mode Characteristics[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(10): 1771-1776. DOI: 10.1109/50.337489
- [6] ARMAN B, FALLAKHAIR, KAI S, MURPHY T E. Vector Finite Difference Modesolver for Anisotropic Dielectric Waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(11): 1423-1431
- [7] SELLERI, STEFANO P. Modal Analysis of Rib Waveguide Through Finite Element and Mode Matching Methods[J]. Optical and Quantum Electronics, 2001, (33): 373-386. DOI:10.1023/A:1010838716217
- [8] SUJECKI S. Arbitrary Truncation Order Three-Point Finite Difference Method for Optical Waveguides with Stepwise Refractive Index Discontinuities[J].Optical Letter, 2010,(35): 4115-4117
- [9] LU Y C, HUANG W P, JIAN S S. Full Vector Complex Coupled Mode Theory for Tilted Fiber Gratings[J]. Optical Express, 2010, (18): 713-726
- [10] BERENGER J P. A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves. Journal of Compututation Phsics[J]. 1994, 114(2) :185-200. DOI: 10.1006/jcph.1994.1159
- [11] YU C P, CHANG H C. Yee-Mesh-Based Finite Difference Eigenmode Solver with PML Absorbing Boundary Conditions for Optical Waveguides and Photonic Crystal

Fibers[J].Optical Express, 2004,(12): 6165-6177

- [12] CHIOU Y P, CHIANG Y C, CHANG H C. Improved Three-Point Formulas Considering the Interface Conditions in the Finite-Difference Analysis of Step-Index Optical Devices[J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(2): 243-251. DOI: 10.1109/50.822799

作者简介



赵佳,山东大学副教授;主要研究领域为硅基光电子集成技术、激光物理与技术;承担多项国家级项目;已发表论文 30 余篇。



韩林,山东大学副研究员;主要研究领域为电磁场数值计算、光电子器件设计;承担多项基金项目 and 横向项目;已发表 SCI 检索论文 10 余篇。



黄卫平,山东大学教授;主要研究领域为光电子器件、光电子集成和光通信技术,主要学术贡献为非正交耦合模理论、矢量波束传播算法、半导体激光器分层建模理论以及大规模光电集成芯片和系统的复模式理论等,为光电集成器件设计和分析提供了有效工具;已在国际学术刊物上发表论文 200 余篇、国际学术会议上发表论文 100 余篇,并持有美国专利 7 项。

← 上接第 6 页

- Quantum Electronics, 1986, 22(6): 873-879
- [2] SOREFF R A, SCHMIDTCHEN J, PETERMANN K. Large Single-Mode Rib Waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(8): 1971-1974
- [3] RICKMAN A G, REED G T, NAMAVAR F. Silicon-on-Insulator Optical Rib Waveguide Loss and Mode Characteristics[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(10):1771-1776
- [4] LUAN H C, LIM D R, LEE K K, et al. High-Quality Ge Epilayers on Si with Low Threading-Dislocation Densities[J].Appl. Phys. Lett. 1999,(75): 2909.DOI: 10.1063/1.125187
- [5] BOGAERTS W, BAETS R, DUMON P, et al. Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology. Journal of Lightwave Technol, 2005,(23):401
- [6] LIU A, JONES R, LIAO L, et al. A High-

- Speed Silicon Optical Modulator Based on a Metal-Oxide-Semiconductor Capacitor[J]. Nature, 2004, (427):615-618.DOI: 10.1038/nature02310
- [7] LIU A, LIAO L, RUBIN D, et al. High-Speed Optical Modulation Based on Carrier Depletion in a Silicon Waveguide[J]. Optical Express,2007, (15): 660-668
- [8] SOREFF R, BENNETT B. Electrooptical Effects in Silicon[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(1):123-129
- [9] LIU J, BEALS M, POMERENE A, et al. Waveguide-Integrated, Ultralow-Energy GeSi Electro-Absorption Modulators [J]. Nature Photonics,2008(2):433-437
- [10] FANG A W, PARK H, COHEN O, et al. Electrically Pumped Hybrid AlGaInAs-Silicon Evanescent Laser [J].Optical Express, 2006,(14):9203-9210
- [11] LIU J, SUN X, AGUILERA R C, et al. Ge-on-Si Laser Operating at Room Temperature[J]. Optical Letter, 2010, 35(5): 679-681. DOI: 10.1364/OL.35.000679

作者简介



孙笑晨,中兴光电子技术有限公司技术总监;主要研究领域为硅光子、光子集成;已发表 SCI 论文 40 余篇。



张琦,中兴光电子技术有限公司研发总监;主要研究领域为高速大容量光通信、硅光集成;先后主持和参加基金项目 10 余项,获得 3 项科研成果奖;已发表论文 20 余篇。

宽带电光调制器的研究现状与新型硅基混合集成调制器的发展趋势

Broadband Electro-Optical Modulator and Development Trend of New Silicon-Based Hybrid Integrated Modulator

李金野/LI Jinye^{1,2}
于丽娟/YU Lijuan¹
刘建国/LIU Jianguo^{1,2}

(1. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)
(1. Institution of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0015-006

摘要: 雷达、电子对抗、无线通信正向着宽带化、集成化、阵列化的方向快速发展, 对电光调制器的带宽、半波电压、尺度等提出了更加苛刻的要求。分别对铌酸锂、磷化铟、硅基以及聚合物电光调制器进行了剖析, 证明单一材料体系已难以满足系统应用需求。指出硅基混合集成电光调制器融合了多种材料体系的优点, 将会对未来微波光子模拟光传输链路和信息处理的发展提供强有力的支撑。

关键词: 电光调制器; 硅基混合集成; 低半波电压; 小尺度

Abstract: Radar, electronic countermeasure and wireless communication have developed rapidly in the direction of broadband, integration and array, which brings more challenges on bandwidth, half-wave voltage and footprint of the electro-optical modulator. In this paper, modulators based on different material system, including the lithium niobate, indium phosphide, silicon and electro-optical polymer are analyzed, which shows that the single material system is difficult to meet the system application requirements. In this case, a silicon-based hybrid integrated electro-optical modulator combining the advantages of various material systems is proposed, which is expected to provide a strong support for the development of microwave photon analog optical transmission links and information processing.

Key words: electro-optic modulator; silicon-based hybrid integration; low half-wave voltage; small scale

近年来, 雷达与电子对抗、无线通信等信息系统正朝着宽带化、集成化和小型化的方向快速发展。这些信息系统对模拟光链路都具有严格的要求, 调制器是模拟光链路中的核心器件, 需要具有高带宽、低半波电压、低插入损耗、小体积以及高线性度等特性。

众多机构对研制高性能调制器进行了深入探索, 取得了卓有成效的进展和成果。按材料体系分类, 电光调制器主要分为铌酸锂(LiNbO₃)调制器、磷化铟(InP)调制器、硅调制器和聚合物电光调制器, 几种调制器各具特色。例如: LiNbO₃调制器是最成

熟的电光调制器, 带宽大、可靠性好, 但尺寸大, 难以实现与激光器和探测器集成; InP调制器易集成, 但损耗高、成熟度低; 硅调制器尺寸小, 损耗低, 但线性度差; 聚合物电光调制器带宽大, 但损耗高、可靠性差。因此, 单靠一种材料体系, 难以满足微波光子系统对宽带调制器的需求。硅基混合集成调制器融合了硅基材料体系易于集成和其他材料体系电光系数高的优势, 获得了高度关注并极有可能在未来宽带信息系统中发挥重

要的作用。

1 调制器发展现状分析

宽带光调制器按照材料分类主要分为LiNbO₃调制器、InP基调制器、硅基调制器, 以及聚合物电光调制器。

1.1 LiNbO₃电光调制器

LiNbO₃具有电光系数大、本征调制带宽大、波导传输损耗小、稳定性好等优点。LiNbO₃调制器是目前发

收稿日期: 2017-08-05
网络出版日期: 2017-09-13
基金项目: 科技部“973”与重点研发计划项目(2017YFF0104601, 2014CB340102)
国家自然科学基金项目(61527820, 11674313, 61535014, 61727815, 61625504)

展最成熟的调制器,其利用线性电光效应实现电信号对光信号的调制,通过外加电场改变光在晶体中传播的折射率,进而改变光的相位和偏振态,利用 Mach-Zehnder 结构可实现相位调制到强度调制的转换。所以 LiNbO₃ 调制器在模拟光链路中可作为相位调制器、偏振调制器和强度调制器。

早期 LiNbO₃ 调制器采用集总电极结构,但受到光波通过晶体的渡越时间以及外电路的电阻电容(RC)时间常数限制,器件调制带宽严重受限。为了克服这种限制,人们采用了行波电极结构,调制带宽不再受 RC 时间常数的限制。早在 1999 年,行波电极 LiNbO₃ 调制器的报道带宽就已达到 40 GHz^[1]。而此时光波与微波的速度匹配、源和传输线的阻抗匹配以及微波传输损耗则是影响带宽的主要因素。常采用的速度匹配方法有应用厚金属电极,引入开槽结构,在电极下镀一层低介电常数的缓冲层以及采用倒相电极结构和分段电极结构^[2]。这些方法有时会减小光场和电场的重叠^[3],从而降低调制效率。为了提高调制效率,又有减薄 LiNbO₃ 厚度,设计脊型钛扩散 LiNbO₃ 波导结构,减小地电极宽度等方法,调制带宽可达 105 GHz^[4]。在商业应用上,Photline 公司和 EO space 公司已有很成熟的 40 GHz/60 GHz LiNbO₃ 调制器产品,EO space 公司现已研发出 110 GHz 的调制器,小体积、低功耗的 LiNbO₃ 调制器也有很多突破,目前主要应用于军事及航天产业中^[5]。

上述传统的体材料 LiNbO₃ 调制器可以实现宽带调制,但一般 V_{π} 高,体积大,对偏振敏感,插入损耗大。所以近几年基于单晶 LiNbO₃ 薄膜的调制器备受关注,包括单晶 LiNbO₃ 薄膜与易刻蚀的材料形成的混合集成调制器,以及刻蚀单晶 LiNbO₃ 薄膜形成的微纳 LiNbO₃ 调制器。2017 年哈佛大学报道了纳米光子 LiNbO₃

调制器,利用高精度刻蚀工艺在二氧化硅(SiO₂)上的单晶 LiNbO₃ 薄膜上制备跑道型和 Mach-Zehnder 型电光调制器,最终带宽分别达到 30 GHz 和 15 GHz^[6]。

1.2 InP 基调制器

InP 基调制器多采用多量子阱结构(MQW),主要分为电吸收型和电光型。InP 基电吸收型调制器利用量子限制 Stark 效应(QCSE),通过外加电场改变 MQW 对光的吸收,进而改变光的强度;InP 基电光型调制器是利用 QCSE 引起的材料折射率变化实现对光场的相位调制,然后利用 Mach-Zehnder 结构将相位调制转化为强度调制。

在 InP 基调制器研究方面,德国 HHI 和日本 NTT 光子实验室处于国际领先地位,其他国家的一些研究机构也进行了相关研究并取得了一定成果。对其性能的研究和改进主要集中在电极的设计和有源区光波导的设计两方面,以下分别进行阐述。

早期的 InP 基 Mach-Zehnder 调制器也是集总电极型,为了克服 RC 常数对调制带宽的限制,采用行波电极结构,带宽提高可达 45 GHz。还有方案在两端集成了模斑变换器,大大降低了插入插损^[7];为了尽可能实现阻抗和速度匹配,Suguru AKIYAMA 等人提出了沿着光波导制作分段的行波电极来提高调制带宽^[8];在此基础上,将相位电极独立于行波电极来调整工作点,可形成驱动简单、零啁啾调制的串联推挽结构^[9];另外,InP 基调制器采用半绝缘衬底也可以增加调制带宽^[10]。

传统的 InP 基调制器的有源区是 pin 结构,而 p 型包层损耗大,薄非掺杂层电容大,很难满足速度和阻抗匹配^[11]。针对此问题,日本 NTT 实验室提出了 nin 型结构,降低了接触电阻和损耗,提高了载流子迁移率,实现了大于 40 GHz 的宽带调制^[12]。为了进一步提高调制效率,Yoshihiro

OGISO 等人提出了 nipn 结构,加了薄弱的 p 型层作为电子阻挡层,使电场更有效地施加在非掺杂的 i 层,最上层的 n 型结构应用反向梯形结构降低了接触电阻和寄生电容,最终实现了调制带宽大于 67 GHz、片上损耗小于 2 dB、半波电压低于 1.5 V 的高性能调制器^[13]。

InP 基调制器调制效率高,驱动电压小,通过适当的设计可实现宽带调制;另外,其器件结构紧凑,易于集成,尤其是与光源可实现单片集成,在这一点上已有相关报道。但 InP 基调制器对材料和工艺要求都很高,成本和集成难度也很大,目前中国在该方面的研究与国际先进水平相比还有很大差距。

1.3 硅基调制器

硅基电光调制器根据调控机理可以分为两种:电折射率调制器和电吸收调制器。前者是基于等离子色散效应^[14],后者是基于 Frankz-Keldysh 效应^[15]或者 QCSE 效应^[16]。其中,电折射率调制器根据光学结构的不同主要分为两种:微环谐振腔型和 Mach-Zehnder 型。微环结构的光调制是利用电信号改变微环结构中波导的有效折射率,从而改变微环的谐振状态,对特定波长实现光强的调制;而 Mach-Zehnder 型结构是通过外加电信号改变相移臂波导的有效折射率,使光的干涉效应发生变化,进而改变光强。

2004 年 Intel 的研究人员在 Nature 上报道了调制带宽达到 1 GHz 的 Mach-Zehnder 型硅基调制器^[17],并在 2005 年已经将其电学调制带宽优化到 10 GHz。2005 年,Cornell 大学的徐千帆等人通过优化波导截面,采用微环结构制作出了带宽达到 1.5 GHz 的高集成度的硅基微环调制器^[18]。2007 年,LIU Ansheng 等人制作出基于反偏 PN 结结构的调制器,采用多模耦合器结合 Mach-Zehnder 结构,调制带宽达到 20 GHz^[19]。随后,LIAO L

等人利用同样的器件,进一步优化电极,实现了 30 GHz 的调制带宽^[20]。另外,为了提高调制器的性能,多种改进方法相继被提出来,例如:通过掺杂补偿来减小波导传输损耗,通过采用包覆型 PN 结增加载流子与光场间的相互作用从而提高调制效率^[21],通过 pipin 掺杂方式减小载流子高掺杂引起的吸收损耗,通过推挽式电极驱动减小外置电压进而减小功耗^[22],通过采用插指 PN 结方式提高调制效率,通过在脊型硅波导上沉积一层氮化硅产生非对称应变进而提高线性度^[23],通过行波铜电极对行波铝电极的替换进一步提高调制带宽等。

微谐振腔型调制器尺寸很小,电学结构简单,但其温度敏感性高,同时受限于光子寿命的影响,调制带宽相对较小,很难实现宽带调制; Mach-Zehnder 型调制器的调制带宽大,但对温度变化不敏感,相应的插入损耗也较大。总体来讲,硅基调制器通过合理的设计可以实现宽带、低 V_{π} 调制,且体积小,与互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺兼容,工艺成熟度高,易于实现大规模集成;但其线性度较差,有待于提高。

1.4 聚合物电光调制器

聚合物电光调制器利用线性电光效应来实现电信号对光信号的调制,在光波电场和外加电场的作用下,引起材料的非线性极化,并导致其光学各向异性,从而实现对光的相位、偏振态以及强度的调制。

1991 年出现了第一个高频聚合物调制器,带宽达到 20 GHz^[24],自此以后,聚合物调制器被广泛研究,并有大量相关文献进行报道。Hoechst Celanese Corp 采用相同的材料,设计了行波电极结构,实现了带宽超过 40 GHz 的调制器。美国加州大学洛杉矶分校、南加州大学与 TACAN 公司联合,成功制备和表征了超过 110 GHz 的高带宽聚合物调制器^[25], CHEN Datong 等人制备了带宽达 113

GHz 的聚合物调制器^[26], Bell 实验室后来更是将此记录改写,实现了高达 150~200 GHz 的调制带宽。除带宽之外,随着 NLO 发色基团和器件结构的改进,半波电压也大大降低,在文献[27]中,聚合物调制器在 1 300 nm 和 1 550 nm 波长处,500 GHz 以下调制时 V_{π} 分别低至 3.7 V 和 4.8 V;通过改进,文献[28]又将上述 V_{π} 值分别减小到了 2.4 V 和 3.7 V。

相较于无机和半导体调制器而言,聚合物调制器有其独特的优点。比如:聚合物材料的微波介电常数低,更易实现速度匹配,有实现更大调制带宽的潜力;电光系数大,从而 V_{π} 更小;材料价格低廉,工艺兼容性好。但其也有很多缺点,比如:在通信波长范围内插入损耗较大,长期热稳定性差,光稳定性较差,聚合物的极化效率和电光系数难以保持等,所以要将其应用于商业设备,还需深入研究。

2 新型硅基混合集成调制器

单一材料体系调制器的固有限制促进了混合材料体系调制器的发展。包括硅基-有机物混合集成调制器、硅基-LiNbO₃ 混合集成调制器以及硅基-III-V 族混合集成调制器等。以下分别进行阐述。

2.1 硅基-有机物混合集成调制器

硅基-有机物混合集成 (SOH) 调制器是将电光聚合物材料填充到两个相距很近的脊型硅波导之间形成的狭缝 (slot) 波导中,其电光调制效率相比于传统的聚合物调制器有很大提高, $V_{\pi}L$ 减小了一个数量级^[29]。2008 年, Tom BAEHR-JONES 报道了硅狭缝波导和非线性聚合物包层形成的混合集成调制器, $V_{\pi}L$ 低至 0.5 V·cm^[30]。2010 年,该实验室报道了第一个近红外波段宽带 SOH 调制器,带宽为 3 GHz, $V_{\pi}L$ 为 0.8 V·cm。适当增加硅波导的厚度和合理掺杂,可以进一步提高调制带宽^[31]。2014 年出

现了第一个带宽达到 100 GHz 的 SOH 调制器^[32]。2016 年李凯丽等人仿真了硅基-有机物材料混合 Mach-Zehnder 型调制器,在条形波导和狭缝波导之间设计了模式转换器来提高模式转换效率,仿真得到调制带宽达 137 GHz^[33]。

SOH 调制器的原理如图 1 所示,光波导结构为填充有机聚合物材料的 slot 波导,光的准横电场 (TE) 模式限制在 slot 波导内,施加电压时, slot 波导内形成强电场,电场和光场模式之间有很大的交叠,因此调制效率较高^[32]。为了减小薄条形加载硅条的阻抗,采用加直流栅电压的方式形成高电导率的电子积累层进而减小阻抗,相比于掺杂方式,电子迁移率不受杂质散射的影响,提高带宽的同时降低了光损耗。如图 1a) 所示, slot 两侧的硅波导通过薄条形加载硅条连接电极,电光聚合物填充到 slot 中,轻掺杂的硅衬底被用作栅极。图 1b) 所示为波导的截面和准 TE 传输模式的电场分布图,光场被限制在 slot 中,图中也展示了等效 RC 电路 (C 为 slot 电容, R 为条形加载的电阻)。当在 SiO₂ 两侧加正电压时,栅极电压 V_{gate} 会使条形加载的能带弯曲,在条形加载中形成高电导率的电子累积层。 E_v 、 E_c 、 E_v 分别是费米能级、导带能级和价带能级, q 表示是电子电量,如图 1c) 所示。

2.2 硅基-LiNbO₃ 混合集成调制器

硅基-LiNbO₃ 混合集成调制器近几年取得了很大进展。2013 年, Vincent STENGER 等人通过离子注入与晶体键合技术相结合,在石英衬底上键合单晶铌酸锂 (LN) 薄膜,以此来形成电光调制器,调制带宽达 24 GHz^[34]。2014 年, CHEN Li 等人报道了混合集成的 LN 薄膜硅基环形电光调制器, 3 dB 带宽达到 5 GHz^[35]。2015 年,该实验室报道了高线性硅基-LiNbO₃ 混合集成的环形调制器^[36],无杂散动态范围 (SFDR) 在 1 GHz 和 10

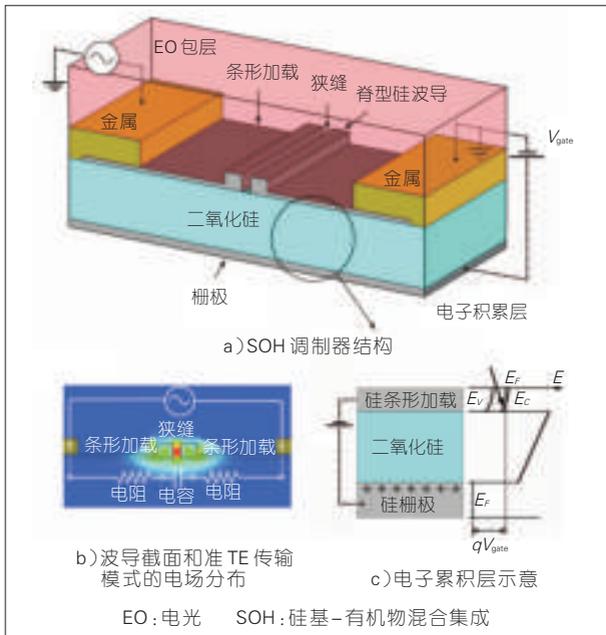


图1 SOH调制器原理

GHz 分别达到 98.1 dB/Hz²³ 和 87.6 dB/Hz²³, 优于传统的硅基环形调制器。2016 年 4 月, JIN Shilei 等人报道了应用氮化硅脊型波导的硅基混合集成的 Mach-Zehnder 型调制器, 3 dB 带宽达 8 GHz, $V_{\pi}L$ 为 $3 \text{ V} \cdot \text{cm}$ ^[37]。2016 年 7 月, Andrew J. MERCANTE 等人报道了与 CMOS 兼容的硅基混合电光调制器, RF 调制带宽达 110 GHz^[38]。在 2016 年 12 月, Ashutosh RAO 等人报道了硅基-LiNbO₃ 混合集成的小型高性能 Mach-Zehnder 调制器, 调制带宽达 33 GHz, $V_{\pi}L$ 在直流和 50 GHz 下分别低至 $3.1 \text{ V} \cdot \text{cm}$ 和 $6.5 \text{ V} \cdot \text{cm}$ ^[39]。

Mach-Zehnder 型硅基-LiNbO₃ 混合集成调制器^[40]的结构如图 2a) 所示。在图 2b) 中, 左侧为 1550nm 波长处光场 TE 模式模场分布图, 右侧为 10 GHz 时的 RF 场分布, 其中标注 Au 处代表金属电极, 硫族化物(ChG)脊型结构用矩形白框表示。用离子注入与晶体键合技术相结合, 在硅衬底上的 SiO₂ 层上直接键合一层亚微米厚的单晶 LN 薄膜, LN 薄膜具有和体 LiNbO₃ 材料基本一致的大电光系数, 所以可实现高效率电光调制。利用 LN 薄膜和 SiO₂ 层的折射率差可实现光场的纵向限制, 而 LiNbO₃ 材料难

刻蚀的特点, 此方案在 LN 薄膜上沉积折射率匹配的 ChG, 形成脊型光波导, 从而加强对光场的横向限制。此种调制器利用了 LN 薄膜的大电光系数, 以及 LN 薄膜与 SiO₂ 层的高折射率差, 实现了对光场的强限制, 大大减小了电极间距, 从而使 $V_{\pi}L$ 参数显著降低, 且更有利于实现集成。另

外, 通过改变脊型材料的组分、结构参数可以进一步优化设计, 提高带宽且减小光损耗, 具有很大的优势和开发前景。

另外, III-V 族材料与硅基混合集成也可实现高速高效调制。2012 年, UCSB 的 J.E.BOWER 小组提出了基于 QCSE 效应的硅基电吸收调制器, 实现 InP 基底和 SOI 材料的键合, 该器件在 1 300 nm 波段的调制带宽预测高达 74 GHz^[41]。2016 年 8 月, UCSB 的 ZHANG Chong 等人报道了高线性度环形辅助 III-V/Si 基混合集成 Mach-Zehnder 调制器 (RAMZM), 结构如图 3 所示, 通过调控复合波导的介电常数以及环和相位调制臂的耦合系数, 可以减小 Mach-Zehnder 调制器传输函数的非本征、非线性特性, 进而提高线性度, 此方案中的 SFDR 在 10 GHz, 环形结构弱耦合条件下可以达到 117.5 dB/Hz^{23[42]}。

综合考虑模拟光链路对调制器的应用需求, 如大带宽、低 V_{π} 、低插入损耗、高成熟度、高稳定性等, 利用 LN 薄膜具有大的电光系数等特点, 同时考虑到硅波导的研究也已非常

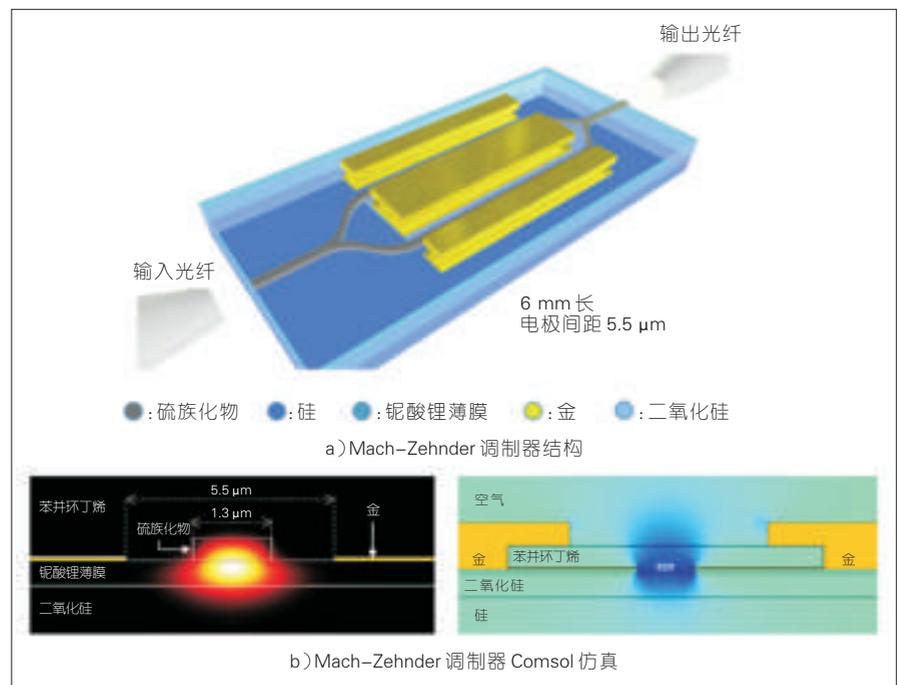


图2 硅基-LiNbO₃混合集成调制器示意

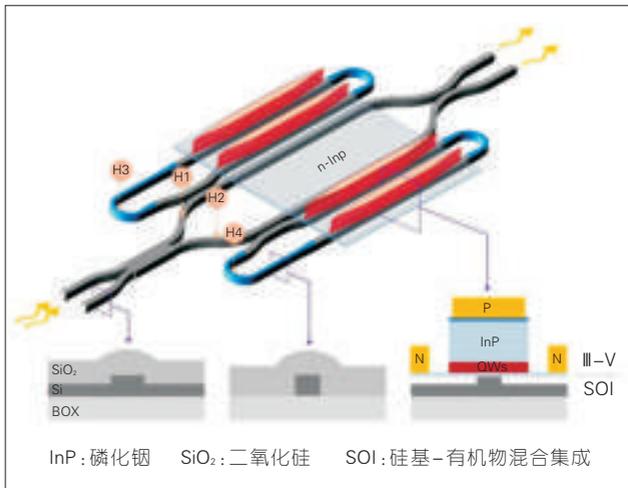


图3
III-V/Si异质集成
RAMZM结构示意图

成熟,将LN薄膜与硅基衬底集成,将带来独特的优势。通过合理的设计可实现宽带高效率调制,做到在与传统LiNbO₃调制器保持基本一致的调制带宽、消光比和动态范围时,降低尺寸、 V_{π} 以及损耗,且与CMOS工艺兼容,易于实现小型集成化,因此为未来的高速光电集成提供了很好的前景。

3 结束语

宽带电光调制器是宽带雷达、电子对抗以及无线通信领域中的核心电光转换器件,多年来一直是国际上的研究热点。传统的体材料LiNbO₃调制器发展最成熟,可以实现宽带调制,但一般半波电压高,体积大,插入损耗也大;InP基调制器性能较好,易于集成,但材料和工艺复杂,成本较高;硅基调制器体积小,有利于大规模集成,但线性度相对较差;聚合物调制器带宽很宽,但稳定性较差。基于硅基衬底的混合集成调制器可以通过优化设计实现不同材料体系的优势结合,提高调制器的整体性能,是当前的研究热点之一,极有可能在未来宽带信息网络中扮演重要角色。

参考文献

[1] GREENBLATT A S, HOWERTON M M, MOELLER R P, et al. Low Drive Voltage, 40GHz LiNbO₃ Modulators[C]// Optical Fiber Communication Conference. USA: Optical Society of America, 1999: 284–286.

- [2] NOGUCHI K. Ultra-High-Speed LiNbO₃ Modulators[J]. Journal of Optical & Fiber Communications Reports, 2007, 4(1): 1–13.
- [3] MACARIO J, YAO P, SHI S, et al. Full Spectrum Millimeter-Wave Modulation[J]. Optics Express, 2012, 20(21): 23623–23629. DOI: 10.1364/OE.20.023623
- [4] GHEORMA I L, SAVI P, OSGOOD R M. Thin Layer Design of X-cut LiNbO₃ Modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(12): 1618–1620. DOI: 10.1109/68.896326
- [5] CHARCZENKO W, CIMOLINO M, ABBAS G, et al. Wideband Modulators and Transmitters for Analog Fiber Optic Links[C]// Avionics, Fiber-Optics and Photonics Conference. USA: IEEE, 2013: 41–42. DOI: 10.1109/AVFOP.2013.6661613
- [6] WANG C, ZHANG M, STERN B, et al. Nanophotonic Lithium Niobate Electro-Optic Modulators[EB/OL]. (2017-01-23)[2017-07-20]. <https://arxiv.org/abs/1701.06470>
- [7] HOFFMAN D, STAROSKE S, VELTHAUS K O. 45GHz Bandwidth Travelling Wave Electrode Mach-Zehnder Modulator with Integrated Spot Size Converter[C]// International Conference on Indium Phosphide and Related Materials. USA: IEEE, 2004: 585–588. DOI: 10.1109/ICIPRM.2004.1442793
- [8] AKIYAMA S, ITOH H, SEKIGUCHI S, et al. InP-Based Mach-Zehnder Modulator With Capacitively Loaded Traveling-Wave Electrodes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(5): 608–615. DOI: 10.1109/JLT.2007.915278
- [9] BRAST T, KAISER R, VELTHAUS K O, et al. Monolithic 100Gb/s twin-IQ Mach-Zehnder Modulators for Advanced Hybrid High-Capacity Transmitter Boards[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition. USA: IEEE, 2011: 1–3
- [10] AKIYAMA S, HIROSE S, ITOH H, et al. 40Gb/s InP-Based Mach-Zehnder Modulator with A Driving Voltage of 3V pp[C]// International Conference on Indium Phosphide and Related Materials. USA: IEEE, 2004: 581–584. DOI: 10.1109/ICIPRM.2004.1442792
- [11] ROLLAND C, MOORE R S, SHEPHERD F, et al. 10 Gbit/s, 1.56 μ m Multi-Quantum Well InP/InGaAsP Mach-Zehnder Optical Modulator[J]. Electronics Letters, 2002, 29(5): 471–472. DOI: 10.1049/el:19930315
- [12] KIKUCHI N, TSUZUKI K, YAMADA E, et al. InP-Based High-Speed Mach-Zehnder Modulator[J]. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2005, 6014: 09–16. DOI: 10.1117/12.630438
- [13] OGISO Y, OZAKI J, UEDA Y, et al. Over 67 GHz Bandwidth and 1.5 V V_{π} InP-Based Optical IQ Modulator with n-i-p-n Heterostructure[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(8): 1450–1455. DOI: 10.1109/JLT.2016.2639542
- [14] SOREF R, BENNETT B. Electrooptical Effects in Silicon[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(1): 123–129. DOI: 10.1109/JQE.1987.1073206
- [15] JONGTHAMMANURAK S, LIU J, WADA K, et al. Large Electro-Optic Effect in Tensile Strained Ge-on-Si Films[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(16): 7097. DOI: 10.1063/1.2363948
- [16] KUO Y, LEE Y, REN S, et al. Strong Quantum-Confined Stark Effect in Germanium Quantum-Well Structures on Silicon[J]. Nature, 2005, 437(7063): 1334–1336. DOI: 10.1038/nature04204
- [17] LIU A, JONES R, LIAO L, et al. A High-Speed Silicon Optical Modulator Based on A Metal-Oxide-Semiconductor Capacitor[J]. Nature, 2004, 427(6975): 615–618. DOI: 10.1038/nature02310
- [18] XU Q, SCHMIDT B, PRADHAN S, et al. Micrometre-Scale Silicon Electro-Optic Modulator[J]. Nature, 2005, 435(7040): 325–327. DOI: 10.1038/nature03569
- [19] LIU A, LIAO L, RUBIN D, et al. High-Speed Optical Modulation Based on Carrier Depletion in A Silicon Waveguide[J]. Optics Express, 2007, 15(2): 660–668. DOI: 10.1364/OE.15.000660
- [20] LIAO L, LIU A, RUBIN D, et al. 40Gbit/s Silicon Optical Modulator for High-Speed Applications[J]. Electronics Letters, 2007, 43(22): 51–52. DOI: 10.1049/el:20072253
- [21] ROSENBERG J C, GREEN W M, ASSEFA S, et al. A 25 Gbps Silicon Microring Modulator Based on An Interleaved Junction[J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26411–26423. DOI: 10.1364/OE.20.026411
- [22] DONG P, CHEN L, CHEN Y K. High-Speed Low-Voltage Single-Drive Push-Pull Silicon Mach-Zehnder Modulators[J]. Optics Express, 2012, 20(6): 6163–6169. DOI: 10.1364/OE.20.006163
- [23] CHMIELAK B, WALDOW M, MATHEISEN C, et al. Pockels Effect Based Fully Integrated, Strained Silicon Electro-Optic Modulator[J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17212–17219. DOI: 10.1364/OE.19.017212
- [24] GIRTON D G, KWIATKOWSKI S L, LIPSCOMB G F, et al. 20 GHz Electro-Optic Polymer Mach-Zehnder Modulator[J]. Applied Physics Letters, 1991, 58(16): 1730–1732. DOI: 10.1063/1.105123
- [25] SHI Y, WANG W, BECHTEL J H, et al. Fabrication and Characterization of High-Speed Polyurethane-Disperse Red 19 Integrated Electrooptic Modulators for Analog System Applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(2): 289–299. DOI: 10.1109/2944.577380

[26] CHEN D, FETTERMAN H R, CHEN A, et al. Demonstration of 110 GHz Electro-Optic Polymer Modulators[J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(25): 3335-3337. DOI: 10.1063/1.119162

[27] LEE H M, HWANG W Y, OH M C, et al. High Performance Electro-Optic Polymer Waveguide Device[J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(26): 3779-3781. DOI: 10.1063/1.120541

[28] OH M C, ZHANG H, SZEP A, et al. Electro-Optic Polymer Modulators for 1.55 μ m Wavelength Using Phenyltetraene Bridged Chromophore in Polycarbonate[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(24): 3525-3527. DOI: 10.1063/1.126695

[29] LUO J, JEN K Y. Highly Efficient Organic Electrooptic Materials and Their Hybrid Systems for Advanced Photonic Devices[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(6): 42-53. DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2268385

[30] BAEHR-JONES T, PENKOV B, HUANG J, et al. Nonlinear Polymer-Clad Silicon Slot Waveguide Modulator with A Half Wave Voltage of 0.25V[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(16): 163303-163303-3. DOI: 10.1063/1.2909656

[31] DING R, BAEHR-JONES T, LIU Y, et al. Demonstration of A Low V_{π} L Modulator with GHz Bandwidth Based on Electro-Optic Polymer-Clad Silicon Slot Waveguides[J]. Optics Express, 2010, 18(15): 15618-23. DOI: 10.1364/OE.18.015618

[32] ALLOATTI L, PALMER R, DIEBOLD S, et al. 100 GHz Silicon-Organic Hybrid Modulator [J]. Light Science & Applications, 2014, 3(5): e173. DOI: 10.1038/lsa.2014.54

[33] 李凯丽, 安俊明, 张家顺, 等. 硅-有机材料混合电光调制器的优化设计[J]. 光子学报, 2016, 45(5): 55-61. DOI: 10.3788/gzxb20164505.0523001

[34] STENGER V, TONEY J, POLLICK A, et al. Engineered Thin Film Lithium Niobate Substrate for High Gain-Bandwidth Electro-optic Modulators[C]//2013 Conference on CLEO. USA:IEEE, 2013: 1-2. DOI: 10.1364/CLEO_SI.2013.CW30.3

[35] CHEN L, XU Q, WOOD M G, et al. Hybrid Silicon and Lithium Niobate Electro-Optical Ring Modulator[J]. Optica, 2014, 1(2): 112-118. DOI: 10.1364/OPTICA.1.000112

[36] CHEN L, CHEN J, NAGY J, et al. Highly Linear Ring Modulator From Hybrid Silicon and Lithium Niobate.[J]. Optics Express, 2015, 23(10): 13255-13264. DOI: 10.1364/OE.23.013255

[37] JIN S, XU L, ZHANG H, et al. LiNbO3 Thin-Film Modulators Using Silicon Nitride Surface Ridge Waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(7): 736-739. DOI: 10.1109/LPT.2015.2507136

[38] MERCANTE A J, YAO P, SHI S, et al. 110 GHz CMOS Compatible Thin Film LiNbO3 Modulator on Silicon[J]. Optics Express, 2016, 24(14): 15590-15595. DOI: 10.1364/OE.24.015590

[39] RAO A, PATIL A, RABIEI P, et al. High-Performance and Linear Thin-Film Lithium Niobate Mach-Zehnder Modulators on Silicon Up to 50 GHz[J]. Optics Letters, 2016, 41(24):5700-5703. DOI: 10.1364/OL.41.005700

[40] RAO A, PATIL A, CHILES J, et al. Heterogeneous Microring and Mach-Zehnder Modulators Based on Lithium Niobate and Chalcogenide Glasses on Silicon [J]// Optics Express, 2015, 23(17): 22746-22752. DOI: 10.1364/OE.23.022746

[41] XIAO X, XU H, LI X, et al. 25Gbit/s Silicon Microring Modulator Based on Misalignment-Tolerant Interleaved PN Junctions.[J]. Optics Express, 2012, 20(3):2507-2515. DOI: 10.1364/OE.20.002507

[42] ZHANG C, MORTON P A, KHURGIN J B, et al. Highly Linear Heterogeneous-Integrated Mach-Zehnder Interferometer Modulators on Si[J]. Optics Express, 2016, 24(17):19040-19047. DOI: 10.1364/OE.24.019040

作者简介



李金野, 中国科学院半导体研究所 在读博士研究生; 主要研究方向为混合集成宽带调制器等。



于丽娟, 中国科学院半导体研究所 副研究员; 主要研究方向为半导体光电子器件和光电混合集成技术等; 已发表 SCI 检索论文 30 余篇。



刘建国, 中国科学院半导体研究所 研究员, 中国科学院大学 特聘教授、博士生导师; 主要研究方向为高速光电子器件、光通信与微波光子技术等; 曾获得国家杰出青年基金; 已发表 SCI 检索论文 120 余篇, 获得授权国家发明专利 30 余项。

《中兴通讯技术》2018 年专题计划

期次	专题名	专题名
1	5G 承载网技术和优化组网	中国联通研究院 张云勇 院长
2	大数据智能化无线网络技术	重庆邮电大学 陈前斌 教授
3	毫米波与太赫兹通信技术	东南大学 洪伟 教授 东南大学 王海明 教授
4	5G 回传网络光电子器件技术	中兴光电子技术有限公司 孙笑晨 技术总监 中兴光电子技术有限公司 徐积勇 总经理
5	可再生能源供电的无线通信	清华大学 牛志升 教授
6	区块链技术及其物联网应用	北京航空航天大学 刘建伟 教授

硅基马赫曾德电光调制设计优化与实现

Design Optimization and Implementation of Silicon Mach-Zehnder Electro-Optic Modulators

周林杰/ZHOU Linjie
周砚扬/ZHOU Yanyang
陆梁军/LU Liangjun

(上海交通大学, 上海 200240)
(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai
200240, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0021-009

摘要: 对单端推挽驱动硅基调制器进行了优化设计和实验验证。为了获得较高的调制器性能, 首先对PN结的结构参数和掺杂浓度进行了仿真优化, 以提高调制效率并降低光传输损耗; 其次, 对行波电极的阻抗匹配、相位匹配和微波损耗予以了研究, 重点分析了低掺杂平板区宽度、行波电极传输线宽度(TWE)和间距对调制性能的影响。在理论分析和仿真计算的基础上, 对单端推挽驱动调制器进行了频谱测试、小信号响应测试和高速调制码型测试。调制器的片上插入损耗在7~9 dB, 半波电压约为5 V。偏置电压为0 V时, 优化后的调制器的带宽大于18 GHz, 入射端反射系数低于-20 dB, 行波电极具有较好的阻抗匹配。当反偏电压大于4 V时, 调制器的带宽可增加到30 GHz以上, 并且能实现56 Gbit/s的二进制强度(OOK)调制和40 Gbit/s的二进制相移键控(BPSK)调制。

关键词: 电光调制器; 硅基光子学; 高速收发模块; 光电子器件

Abstract: In this paper, the design optimization and experimental demonstration of single-drive push-pull silicon electro-optic modulators are presented. In order to improve the modulation efficiency and lower the optical propagation loss, the PN junction profile and doping concentrations are firstly optimized. Next, the impedance match, phase match and microwave loss are studied, and in particular, the influence of low-doping slab width, travelling-wave electrode (TWE) width and spacing on the modulator performance are analyzed. Following the comprehensive theoretical analysis and numerical simulation, the modulator performance measurements, including the optical transmission spectrum upon single-drive push-pull tuning, small-signal microwave signal response, and high-speed digital signal modulation are consequently carried out. The on-chip insertion loss of the modulators is around 7-9 dB and the half-wave voltage is 5 V. At a bias voltage of 0 V, the optimized modulator has a modulation bandwidth of >18 GHz. The microwave reflectivity at the entrance of the TWE is less than -20 dB, suggesting good impedance match. When the reverse bias voltage is increased to 4 V, the modulation bandwidth can exceed 30 GHz, allowing for realization of 56 Gbit/s on-off keying (OOK) and 40 Gbit/s binary phase-shift keying (BPSK) modulations.

Keywords: electro-optic modulator; silicon photonics; high-speed transceiver; optoelectronic devices

硅基电光调制器由于其综合性能出众, 吸引了全球各高校、研究所和企业的持续关注。中科院半导体所、上海交通大学和北京大学^[1-10]等是中国最早开展相关研究的科研机构, 同时中兴通讯、武汉光迅等企业已经开展了硅基调制器的产品化工作, 并取得了初步的成果。在其他国家, 知名的研究机构 and 高校如美国的诺基亚贝尔实验室、康奈尔大学、加州大学圣芭芭拉分校、特拉华大学、加拿大的麦吉尔大学、多伦多大学、新加坡微电子研究所、英国萨里大学、南安普敦大学和比利时的根特大学等在硅基调制器方面也进行了多年研究, 涵盖了调制器设计和集成, 也在新材料的应用、工艺加工和新结构探索方面持续创新, 推动硅基调制器的进步和实用化发展^[11-23]。此外, 美国的Intel、Cisco、Acacia和日本的Fujikura等公司均已推出了100 G

的光模块, 投放在光互连市场。随着今后光网络升级到400 G以及数据中心规模的进一步扩大, 对硅基载流子耗尽型马赫曾德调制器(MZI)的进一步研究将主要集中在3个方面:

(1) 提高带宽同时减小功耗; (2) 调制器、驱动电路和激光器的集成; (3) 采用波分复用和高阶码型调制提高数据速率。

提高带宽和减小功耗主要通过

收稿日期: 2017-08-02

网络出版日期: 2017-09-04

基金项目: 国家重点基础研究发展(“973”)规划(1D2011CB301700); 国家高技术研究发展(“863”)计划(2013AA014402); 国家自然科学基金(61422508、61535006)

优化行波电极和PN二极管结构来实现。加拿大麦吉尔大学所设计的硅基调制器^[24],行波电极不同于传统共面波导(CPW)和共面带状线(CPS)结构,它在两条传输线内侧面面向波导方向引入“金属桥”,然后连接一块金属电极,构成T型结构,用于驱动PN二极管。此结构通过优化T型结构参数,可以提高调制性能。在PN二极管中影响调制效率的主要是耗尽层与光模式的交叠部分,波导两侧壁附近的掺杂区域除了带来光传输的损耗之外,并没有对调制效率的提高有太多有益的影响。通过对波导边缘区域进行补偿掺杂降低该区域的载流子浓度,可以有效减小光传输损耗^[25]。提高调制效率也可以采用一种改进后的PN二极管结构^[25],此结构同时存在横向PN结和纵向PN结,形成L形耗尽区域。当施加反向电压后,整个波导的中心部分均为耗尽区域,因此实现了更高的调制效率。

硅为间接带隙材料,不能直接用于制作激光器,目前主流的激光器与硅调制器集成方案为异质混合集成或在硅上外延生长III-V族材料。法国里昂大学的研究团队将布拉格光栅反射镜、激光器、波导模式转换器、移相器、MZI调制器和波导光纤耦合器集成在同一个芯片上^[26]。法国III-V族实验室联合CEA-Leti、Minatec、IMEC和Bell共同研发了调制器与激光器集成芯片,其中分布式布拉格光栅激光器的输出波长范围可以覆盖整个C波段,调制器的调制带宽在13 GHz以上,从而可以实现25 Gbit/s的调制速率^[27]。另一种目前主流的集成方式是将电驱动芯片和硅光芯片混合集成在同一基板上。武汉邮电科学院实现了集成化硅光调制器^[28],将硅光调制器芯片与驱动芯片通过金线键合实现一体化封装,可以实现25 Gbit/s的调制速率。IBM的集成芯片也是将硅光调制器芯片和驱动芯片集成在同一个基板上^[29],该芯片的特点为调制器采用分段行

波电极,每段电极均配有驱动电路,可以实现25 Gbit/s的二进制启闭键控(OOK)调制和46 Gbit/s的脉幅调制(PAM-4)调制。

采用波分复用和高阶码型调制可以获得更高速率调制。Luxtera公司研发的硅光集成波分复用光收发芯片^[30],集成了4路MZI调制器、4路波分复用与解复用模块、4路光探测模块和其他附属功能模块,每路可以产生10 Gbit/s的调制信号。诺基亚贝尔实验室研发了偏振复用QPSK光发射芯片^[31],正交相移键控(QPSK)信号由IQ调制器产生(一个MZI调制器产生I路信号,另一个平行MZI调制器产生Q路信号)。输入光分两路分别进入两组IQ调制器进行QPSK调制,其中一组由偏振旋转器将调制后的信号由准横电波模式(TE)旋转到准横磁波模式(TM),再和另一组TE合成构成PDM-QPSK调制器。每一路的IQ调制器可实现56 Gbit/s的QPSK调制,经过偏振复用就能达到112 Gbit/s的PDM-QPSK调制。之后,贝尔实验室在该工作的基础之上,通过两级QPSK的级联并与锗探测器集成研发出了224 Gbit/s的PDM-16-QAM光收发模块^[32]。

1 高速电光调制器设计

硅基载流子色散型电光调制器的基本设计思路可以概括为如下几个步骤:首先是光学结构的设计,可以是简单直波导实现相位调制,或者是基于干涉或谐振结构实现强度调制;其次是载流子色散效应的电学结构实现,可以采用PN二极管或者金属氧化物半导体(MOS)电容;最后是高速电极设计,电极好坏直接关系到调制器的响应速度,需要精确设计电路结构。光学结构目前采用较多是微环谐振腔和马赫曾德干涉仪,在光学设计中波导的几何尺寸对器件的性能有着很大的影响:提高波导宽度可以有效减少波导侧壁粗糙度引起的光损耗,但波导太宽会导致高阶光

波导模式出现,降低器件的性能;增加平板层厚度可以减小波导侧壁粗糙度对光传输的影响,同时提高单模波导宽度的上限,但由于一部分光泄露到波导两侧,会降低光调制效率。载流子色散效应根据电学实现方式可以归总为载流子注入、载流子耗尽和载流子积累^[33]。在电学结构设计中,要着重考虑电学结构所能实现的调制效率以及对光传输损耗的影响,其中载流子浓度分布形状影响较大。电极设计可以采用集总电极或行波电极。集总电极较小,可以灵活布局于芯片上任意位置,设计时所需要考虑的因素是减小电容和电阻以提高带宽;而行波电极长度通常在毫米量级,在设计时需要考虑3方面因素:(1)减小微波传输损耗;(2)行波电极的特性阻抗需要匹配到50 Ω,满足与微波系统中标准的50 Ω端口兼容,减少反射损耗,确保行波电极上的有效驱动电压;(3)行波电极的有效折射率与光波群折射率相匹配,使微波信号和与光信号达到最强相互作用。将上述不同光学结构、电学结构和电极结构进行组合,就可以构成不同类型调制器。

1.1 单端推挽驱动调制器整体结构

如图1所示为单端推挽驱动硅基马赫曾德调制器结构示意图^[34]。该调制器基于绝缘衬底上的硅(SOI)晶圆设计,光学部分采用的是非对称MZI结构,可以通过调节波长来选择调制器的偏置点。调制器的3 dB分路器和合路器采用多模干涉结构(MMI),MMI结构的特点是分光均匀损耗小。由截面图所示,MZI两臂的波导中均嵌入PN二极管,波导的外侧为P型掺杂,内侧为N型掺杂。MZI两臂外侧的平板层为高浓度的P型重掺杂区,用于连接行波电极保证良好欧姆接触。MZI两臂内侧平板区为高浓度的N型重掺杂区,一方面将两个PN二极管连接,另一方面连接直流偏置电极。行波电极使用的

是共面微带线结构,两条传输线位于MZI外侧,分别为信号线(S)和接地线(G)。相比双端差分驱动调制器,该调制器具有如下两个特点:

(1)行波电极的信号线通过P型电阻、PN结电容、N型电阻、PN结电容和P型电阻连接到行波电极的接地线。其中两个PN结电容串联,其电容值减小一半,可以有效降低行波电极的微波损耗。需要注意的是输入微波信号的幅度也相应需要增加一倍,因为微波信号被均分负载在两个PN结上。

(2)采用单端口微波输入,即可实现推挽驱动,减小了驱动电路复杂度,利于实现多个调制器的集成。假设微波信号驱动电压为 $V_{pp} \cdot \sin(\omega t)$,直流偏置电压为 V_b ,通过MZI中间N型重掺杂区加载到调制器上。当直流和微波信号同时施加在调制器时,一个调制臂PN结上的电压为 $-V_b + V_{pp}/2 \cdot \sin(\omega t)$,另外一个调制臂PN结上的电压为 $-V_b - V_{pp}/2 \cdot \sin(\omega t)$ 。由此可见,在一个驱动信号周期内,调制器形成以 $-V_b$ 为偏置电压,在 $[-V_{pp}/2, -V_{pp}/2]$ 范围内交替变化的完美推挽驱动。相比双端差分驱动调制器,该调制器仅用一个端口就可以实现推挽驱动,推挽信号由调制器电极自身结构产生,可以确保相位严格相差 π ,幅值相同。采用推挽驱动的调制器可以有效减小信号啁啾,提高长距离传输时的信号质量。

1.2 驱动臂上PN结设计

MZI调制器驱动臂上PN结设计分成2个部分:第1部分为波导和PN结几何结构,第2部分为PN结掺杂浓度。重要的几何参数包括:波导宽度 W_{rib} 、波导高度 H_{rib} 、平板层高度 H_{slab} 、低浓度平板层宽度 S_{dop} 、N型重掺杂平板层宽度 W_n 和P型重掺杂平板区宽度 W_p 。我们采用硅光器件常规的脊型波导结构,即 H_{rib} 为220 nm, W_{rib} 为500 nm。 H_{slab} 的增大将导致PN结串联电阻减小,有利于提高调制器

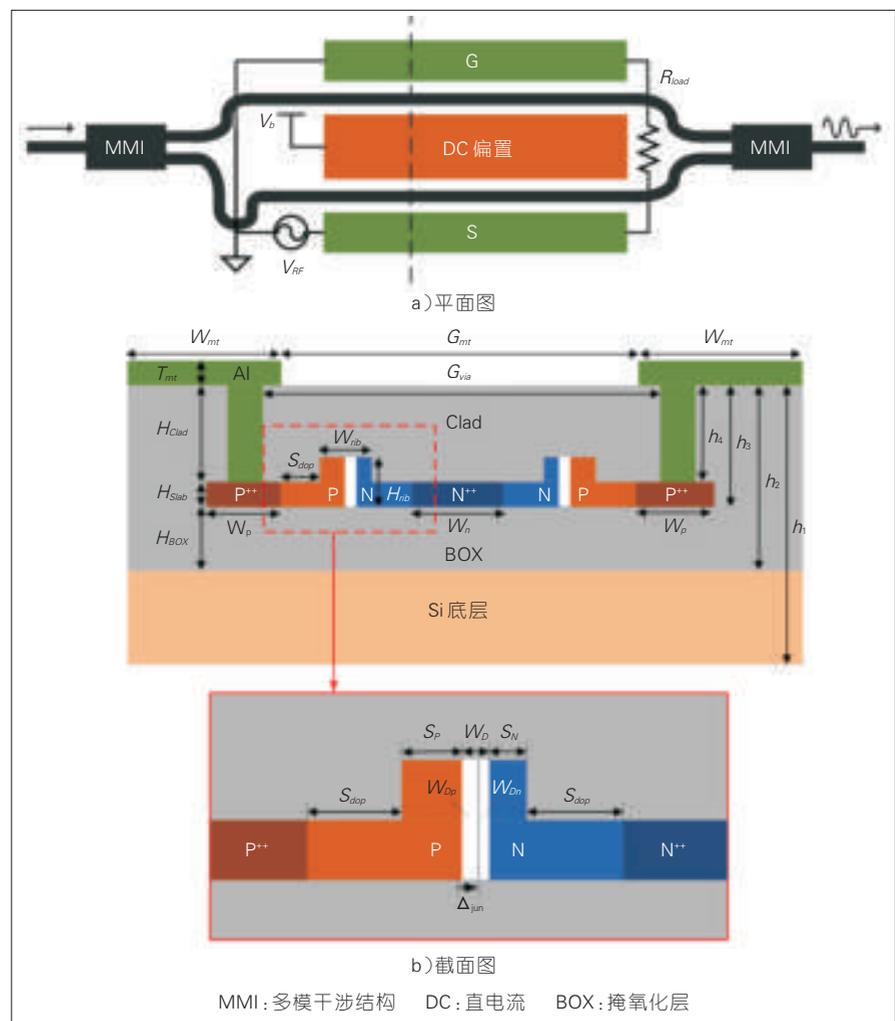
带宽;但同时 H_{slab} 的增大会导致更多的光能量扩散到slab层中,减小了光场与PN结耗尽区的交叠积分,会使调制效率降低。综合考虑两者因素,我们选择 H_{slab} 为90 nm。

PN结的掺杂浓度 N_A (P型掺杂)和 N_D (N型掺杂)是影响调制器性能的两个关键参数。根据等离子色散效应,硅中的自由载流子浓度会对折射率的实部和虚部同时产生影响,即影响调制器的调制效率和光传输损耗。我们使用多物理场仿真软件(Comsol)来仿真调制器的调制效率和光损耗。 N_A 和 N_D 的变化区间为 $10^{17}/\text{cm}^3 \sim 10^{18}/\text{cm}^3$,由于耗尽区的宽度与PN结所加的偏置电压 V_b 有关,所以调制效率可通过波导的有效折射

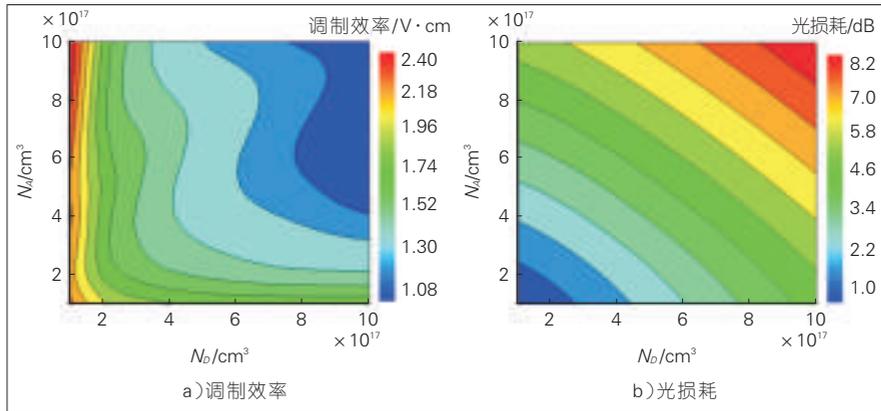
率对电压求导近似得到,其中在偏置电压为 V_b 的情况下半波电压的计算公式为:

$$V_{\pi} L \left. \frac{dn_{eff}}{dV} \right|_{V=V_b} = \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

调制效率 $V_{\pi} \cdot L$ 可以通过 V_{π} 与高速移相器的长度 L 的乘积得到。图2a)中所示为调制器效率仿真的结果。PN结在波导内的偏置量 Δ_{jun} 为100 nm,波长为1550 nm,偏置电压 $V_b=0$ V,长度 L 为3 mm。可以看出提高掺杂浓度可以有效提高调制效率,但当 N_A 和 N_D 的浓度大于 $9 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 以后调制效率的增长趋于恒定。另一方面,由图2b)可知,当掺杂浓度提高后,由于载流子吸收效应增强,会



▲图1 单端推挽驱动硅基马赫曾德调制器结构示意图



▲图2 偏置电压为0 V时的调制效率和光损耗随掺杂浓度变化关系

使调制器的光损耗增大。因此,在选择PN结掺杂浓度时要综合考虑调制效率和光损耗。

PN结的偏移量 Δ_{jpn} 也是决定调制器性能的关键参数,当PN结向N区偏移0.05 mm时,波导的有效折射率变化(0 V和-4 V下波导有效折射率差别)最大,即调制器的调制效率最高。对于光损耗,当PN结向正轴偏移量越大,波导的光损耗越小,这是因为空穴对光的吸收效应要小于电子。如果追求最高的调制效率, Δ_{jpn} 选择50 nm为最优值,如果综合考虑调制效率和光损耗, Δ_{jpn} 选择100 nm为最佳。

图3所示为PN结的掺杂浓度对行波电极特性的影响。提高掺杂浓度可以有效减小行波电极的特性阻抗,增大行波电极的有效折射率以及增大微波的传输损耗。为了能够实现较高的调制效率和带宽,同时兼顾较低的光损耗和微波损耗。我们选择P型掺杂为 $4 \times 10^{17}/\text{cm}^3$,N型掺杂为 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$,在该浓度下,当 $V_b = 0 \text{ V}$,掺杂引起的光损耗为1.85 dB/mm,调制器效率为 $1.05 \text{ V} \cdot \text{cm}$ 。

1.3 高速行波电极设计

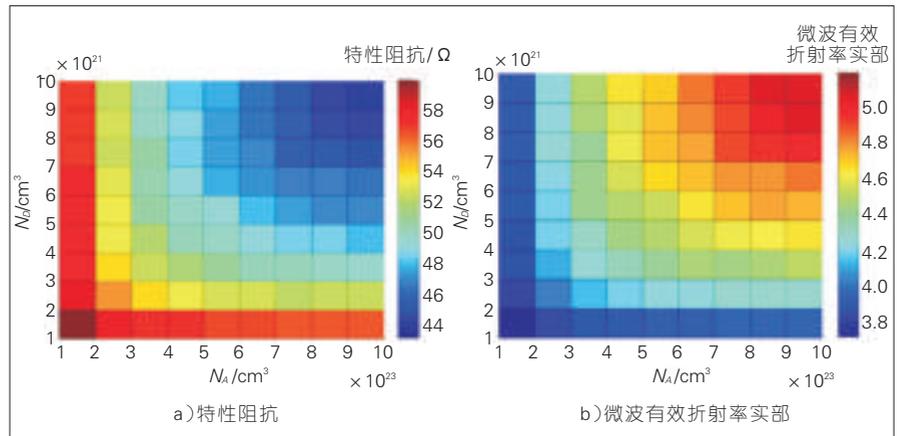
影响行波电极性能的参数有:电极宽度 W_{mt} 、电极传输线间距 G_{mt} 、电极厚度 T_{mt} 、通孔间距 G_{via} 、通孔宽度 W_{via} 、 SiO_2 上包层厚度 H_{clad} 和PN结结构的尺寸,其中需要重点优化的是 S_{dop} , W_{mt}

和 G_{mt} 。

低掺杂平板区宽度 S_{dop} 对微波传输损耗的影响较大,而对特性阻抗和微波有效折射率的影响较小。减小 S_{dop} 时因为PN结的串联电阻会减小,微波损耗会减小,从而可以提高调制器带宽。减小 S_{dop} 的代价是会增大光

的传输损耗,因此需要在光损耗和微波损耗间做个折中选择。采用分段PN结可以有效阻止电流在平板层的传输,有利于减小微波损耗。随着频率的升高,采用分段PN结的行波电极比常规非分段PN结的行波电极微波损耗减小更加明显。

行波电极金属传输线宽度 W_{mt} 和间距 G_{mt} 这两个参数共同影响电磁场的分布,它们对行波电极特性的影响是相互关联的。图4所示为仿真得到的不同 W_{mt} 和 G_{mt} 组合下调制器的电光(EO)带宽。减小 W_{mt} 会提高调制器带宽;减小 G_{mt} 会先增大EO带宽,当达到一个临界值后会使得带宽下降。重掺杂平板区宽度(W_p , W_n)对微波有效折射率、传输损耗和特性阻抗会有一定影响。增大 W_p 和 W_n 会使微波传输损耗和微波有效折射率同时增大,两者对特性阻抗影响并不大。



▲图3 PN结掺杂浓度对行波电极的影响

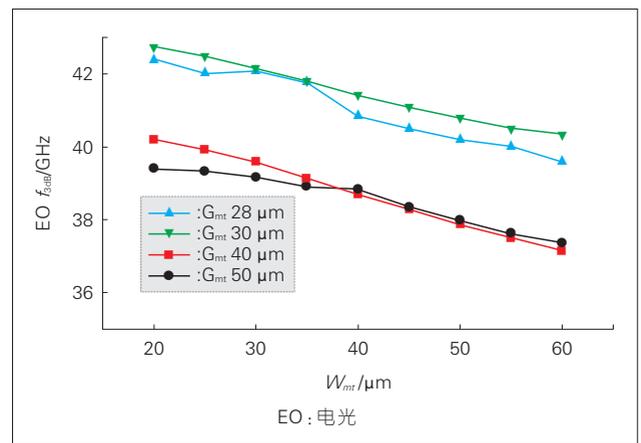


图4 行波电极传输线宽度 W_{mt} 和间距 G_{mt} 对调制带宽的影响

我们选取多种组合 W_p 和 W_n , 分别侧重降低微波传输损耗或实现更好的光与微波的相位匹配。

综合上述仿真分析, 我们在调制器设计中选取多种参数组合(见表1), 之后通过实验来检测不同设计对调制器性能的影响。

2 端推挽驱动硅基调制器实验测试

2.1 直流测试

图5为MZM-5与MZM-7传输频谱和调制效率的测试结果图。这两个调制器PN结的差别在于结的位置偏移量 Δ_{pin} 不同, 分别为0.1 mm和0.05 mm。改变偏置电压会使频谱移动, 说明了载流子色散效应起到了改变相位的效果。它们的静态消光比都在15 dB以上, 说明了MMI具有较均匀的分光比。频谱最高点代表了整个测试链路的损耗, 包括光纤的传输损耗、偏振控制器插损、光纤与波导的耦合损耗和调制器片上损耗, 其中片上损耗包括载流子吸收损耗和波导固有损耗。我们通过测试参考直波导得到了光纤与波导的耦合损耗约为4.5 dB, 两个端面的损耗合计为9 dB, MMI分路器和合路器的损耗为0.9 dB, 光纤链路和偏振控制器损耗约为1 dB。因此MZM-5的片上损耗为7 dB, MZM-7的片上损耗约合计为9 dB。

根据MZI的传输函数, 频谱移动一个自由光谱范围(FSR)相当于相位改变了 2π , 因此可以通过频谱移动的距离来确定相位的变化。根据实验结果可知MZM-5的 V_p 约为5.25 V, MZM-7的 V_p 约为5 V。图5c)和d)为提取的MZM-5和MZM-7的调制效率随反偏电压变化曲线。偏置电压升高会使调制效率降低, 因此在较低的偏置电压下, 可以用较小的驱动电压实现调制, 但调制带宽也会相应变小。当 Δ_{pin} 从0.05 mm变化到0.1 mm时, 损耗的降低较为明显而调制效率

的变化不是很明显。

2.2 微波小信号测试

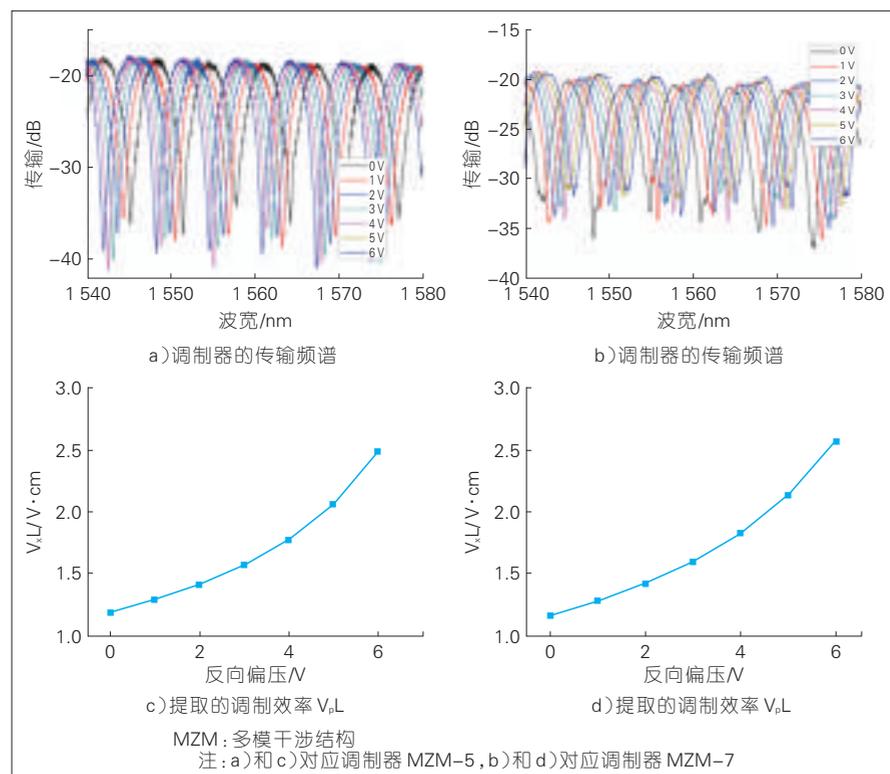
调制器小信号动态测试主要测试行波电极的S参数、特性阻抗和调制器的EO带宽。在S参数测试中, 矢量网络分析仪(VNA)的两个端口分别通过探针加载到行波电极的输入和输出端, 测试前先进行校准来去掉线缆、转接头和探针的影响。这里我们使用标准的校准基片, 对微波链路短路、开路、阻抗匹配和通路4种

状态进行校准, 简称SOLT(short-open-load-thru)法。图6所示为表1给出的7种调制器结构在偏置电压 $V_b = 0$ V的情况下, 行波电极(EE)S参数的测试结果。在这7种调制器中, MZM-1为参考调制器, 其他调制器均是以它为基础进行改进优化。由图6a)所示, 该行波电极 S_{21} 电学6.4 dB带宽为14.9 GHz。采用6.4 dB EE带宽作为衡量标准是因为在阻抗和相位匹配条件下, 6.4 dB EE带宽对应于3 dB EO带宽。调制器MZM-2、3 S_{11}

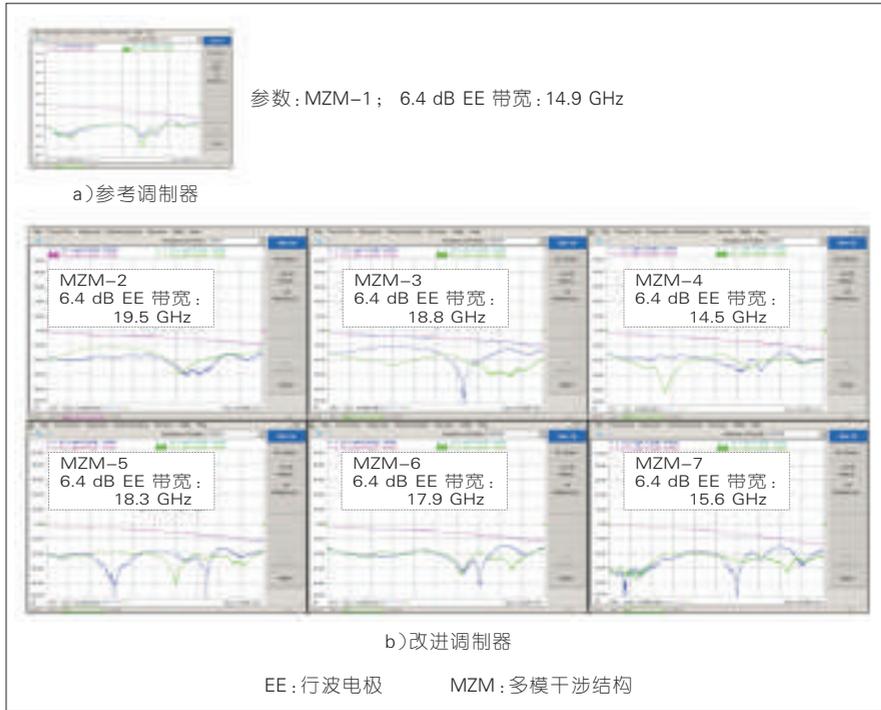
▼表1 调制器设计参数

调制器	W_{mt}/mm	G_{mt}/mm	W_p/mm	W_n/mm	$S_{\text{stop}}/\text{mm}$	$\Delta_{\text{pin}}/\text{mm}$
MZM-1	60	50	16.2	20.7	0.5	0.1
MZM-2	40	6	6	5	0.6	0.1
MZM-3	40	6	6	5	0.5	0.1
MZM-4	80	40	16.2	15.7	0.5	0.1
MZM-5	40	28	14	10.5	0.5	0.1
MZM-6	40	15	12	15	0.5	0.1
MZM-7	60	50	16.2	20.7	0.5	0.05

MZM: 多模干涉结构



▲图5 MZM-5与MZM-7传输频谱和调制效率的测试结果



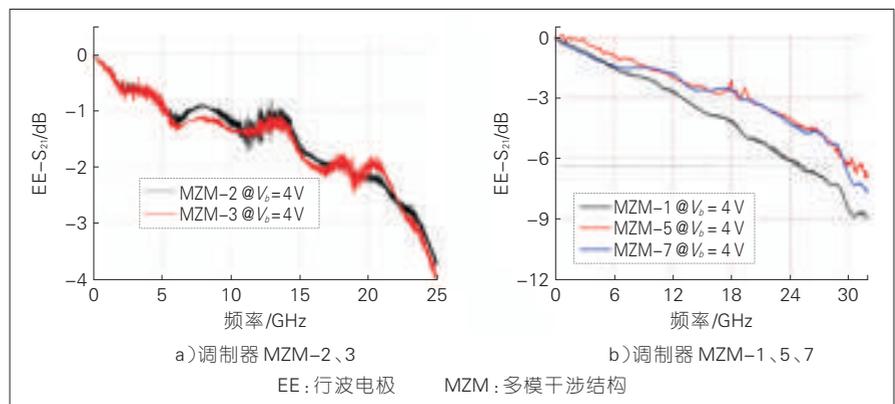
▲图6 偏置电压0 V下行波电极S参数测试结果

参数明显大于调制器 MZM-4、5、6，说明其阻抗匹配较差。MZM-5 具有较高的电学带宽 (18.3 GHz)，同时 MZM-5 微波反射系数 S_{11} 基本上可以低于 -20 dB。MZM-7 在 MZM-1 的结构上改用了分段 PN 二极管结构，实验结果表明该结构可以提高行波电极电学带宽。

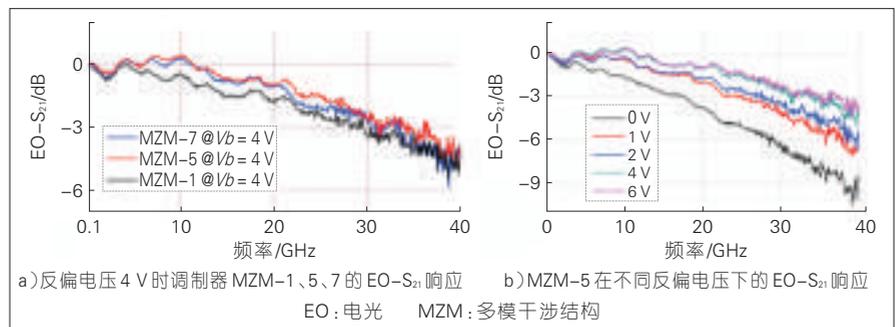
图 7a) 为 MZM-2 和 MZM-3 在偏置电压 4 V 的情况下 S_{21} 的测试结果。MZM-2 的 S_{21} 曲线和 MZM-3 的 S_{21} 曲线较为接近，带宽差别不大，说明 S_{app} 变化 0.1 mm (从 0.6 mm 变化到 0.5 mm) 对行波电极影响不大。图 7b) 为在 4 V 偏置电压下，MZM-1、5、7 的 S_{21} 测试结果。MZM-1 为参考调制器，其 S_{21} 参数最差。MZM-5 在 MZM-1 基础上对电极结构进行了优化，因此其表现出更好的 S_{21} 参数。MZM-7 与 MZM-1 的行波电极结构一样，但采用了分段 PN 二极管结构。根据等效电路模型的理论，该结构减少了 slab 层对微波损耗的影响，因此减小了微波损耗。

我们接着进一步对调制器 MZM-

1、5、7 进行了 EO 带宽测试，结果如图 8a) 所示。MZM-1 的 EO-3 dB 带宽



▲图7 在4 V直流反偏电压下的EE-S₂₁测试结果



▲图8 调制器反向偏压下的EO-S₂₁响应

为 29 GHz，经过优化的 MZM-5 的 EO-3 dB 带宽可以达到 33 GHz，MZM-7 由于采用了分段 PN 二极管结构，因此其 EO 响应的表现也好于 MZM-1，带宽在 30 GHz 以上。图 8b) 所示为 MZM-5 在不同偏置电压下的 EO S_{21} 响应，可以明显的看出提高偏置电压可以有效地增加调制器的 EO 带宽。当偏置电压增大后，PN 结的耗尽层增大导致结电容减小，因而提高了调制器的带宽。

2.3 调制信号眼图测试

我们对设计的调制器进行高速调制测试，信号源采用 40 ~ 56 Gbit/s 的脉冲模式发生器 (PPG) (keysight N4975A)，它能产生码型为 $2^{15}-1$ 的伪随机码 (PRBS)，示波器选用 keysight 的数字信号分析仪 (DSA-X 93204A)。由于单端驱动调制器中有专用的直流偏置信号线，因此偏置电压可经直流探针直接加载到调制器上。在 OOK 调制时，调制器的工作

点选择在MZI传输谱的-3 dB处,即两臂相位差为 $\rho/2$ 。在BPSK调制时,调制器的工作点选择在MZI传输谱的最低点处,即两臂相位差为 ρ ,BPSK的星座图可以通过光调制分析仪测得(OMA N4392A)。由于待测的调制器采用非等臂的MZI,故可以通过调节波长来改变调制器的工作点。

图9所示为MZM-7在调制速率为32 Gbit/s情况下输出信号的眼图,眼图上方显示的为示波器测得的实时波形,其中蓝色线为时钟信号,黄色线为数据信号。图9a)给出调制器在偏置电压 V_b 为0.7 V微波信号幅度 V_{pp} 为1.4 V条件下的眼图。调制信号消光比为4.2 dB, Q值为3.9。图9b)为 V_b 增大到1.5 V, V_{pp} 提高到3 V时的调制信号眼图。此时,消光比提高到了6.6 dB,而Q值也提高到了5.24。实验结果表明:该调制器具有较高的调制效率和带宽,采用低驱动电压就可以获得清晰的调制眼图。

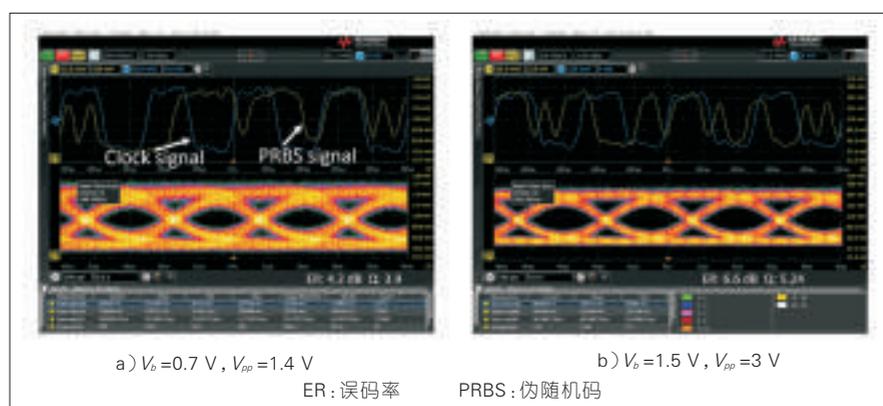
图10所示为MZM-5在50 Gbit/s速率下输出调制信号的眼图。为了获得较高的消光比,PPG的输出信号经电放大器放大到 V_{pp} 为7.8 V。在 V_b 为2 V情况下,调制信号的下降沿出现两条重影,说明此时调制器的带宽已经不能很好支持该调制速率。从眼图上方测得的实时码型图中可以看出,过长的上升沿时间或下降沿时间使得信号还没完成“0”和“1”电平之间的完全翻转就又产生变化。为了解决该问题,我们通过增大偏置电压来提高器件的EO带宽。当 V_b 增加到6 V时,眼图质量得到了较为明显的改善,获得的消光比为6 dB, Q值为5.05。

图11所示为MZM-5和MZM-7在56 Gbit/s速率下测得的眼图。驱动电压为 $V_b=6$ V和 $V_{pp}=7.8$ V。MZM-5的消光比为4 dB, Q值为3.73,由于MZM-7的EO带宽小于MZM-5,所以其眼图质量较差。对比50 Gbit/s的眼图,56 Gbit/s时的调制信号质量有了明显的恶化,这是一方面是由于调

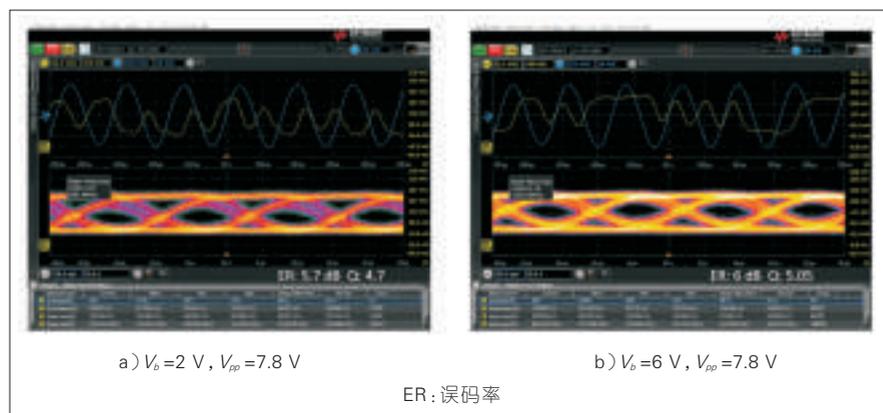
制器的带宽限制,另一方面是由于PPG输出信号已经达到最大速率,其输出电信号质量本身已经下降。

在对调制器进行BPSK测试时,工作点选择在MZI的最小传输点。BPSK输出信号的特点是信号幅值恒定而相位在0和 ρ 间变换,实现 ρ 相移对调制效率有着较高的要求,因此

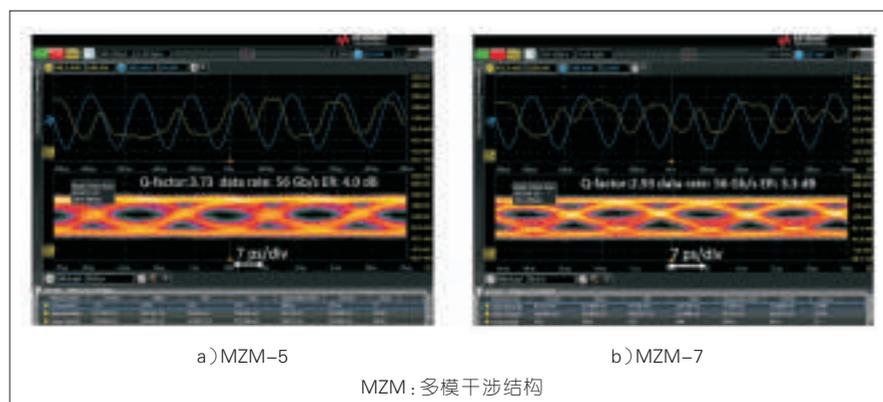
在测试是我们将偏置电压 V_b 降低为4 V。图12所示为通过调制分析仪测试得到的BPSK信号误码率与接收光功率之间的关系。当MZM-5调制信号的信噪比(OSNR)为15.56 dB时,信号的Q值为6.578,信号幅度误差和相位误差分别为18.9%和6.9%,误差向量幅度(EVM)为21.99%。输



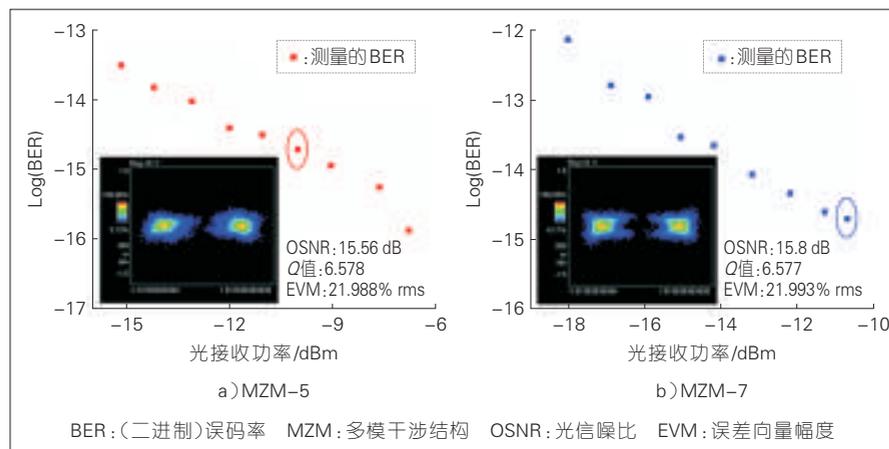
▲ 图9 MZM-7在32 Gbit/s速率下OOK调制的眼图



▲ 图10 MZM-5在50 Gbit/s速率的OOK调制眼图



▲ 图11 56 Gbit/s OOK调制的眼图



▲图12 40 Gbit/s BPSK调制信号误码率与光接收功率关系(插图为BPSK星座图)

出信号的(二进制)误码率(BER)在 10^{-13} 量级以下,低于前向纠错技术对误码率的要求,提高接收信号的光功率可以进一步减小误码率。MZM-7的误码测试结果与MZM-5接近。

3 结束语

大规模数据中心的广泛建立以及骨干网和城域网的升级换代,市场对100 G和400 G光模块的需求日益增长,并且对器件成本和集成度的要求也显著提高。硅基光电子技术是近十年来发展速度最快、最具有前景的光电子技术之一,由于它的制作工艺与现有微电子互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容,造就了其成本低、功耗小、便于和电芯片集成的独特优势。另外由于硅波导对光波具有很强的限制能力,因此可以减小器件尺寸,提高单位面积上光器件的集成度。调制器是光收发模块中的核心器件,近年来发展十分迅速,其中载流子耗尽型调制器是目前研究最为广泛的硅基调制器类型。文章中,我们研究了单端推挽驱动调制器的设计与优化,并对加工后的器件进行了系统测试和对比。芯片测试结果表明调制器的EO带宽在偏置电压-4 V时可以达到30 GHz以上,能实现56 Gbit/s OOK调制和40 Gbit/s BPSK调制。硅基调制器性能的提高还需要进一步优化电学和光学结构,

一方面可以设计新型行波电极结构(比如分段电极),以同时满足阻抗匹配和相位匹配两方面要求,另一方面设计新型的PN结结构,以增强载流子和光波的作用,提高调制器效率。

参考文献

- [1] DING J F, CHEN H T, YANG L, et al. Low-Voltage, High-Extinction-Ratio, Mach-Zehnder Silicon Optical Modulator for CMOS-Compatible Integration[J]. Optics Express, 2012, 20(3):3209-3218. DOI: 10.1364/OE.20.003209
- [2] XIAO X, LI X Y, XU H, et al. 44-Gb/s Silicon Microring Modulators Based on Zigzag PN Junctions[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(9):1712-1714. DOI: 10.1109/LPT.2012.2213244
- [3] XU H, XIAO X, LI X Y, et al. High Speed Silicon Mach-Zehnder Modulator Based on Interleaved PN Junctions[J]. Optics Express, 2012, 20(20):15093-15099. DOI: 10.1364/OE.20.015093
- [4] ZHOU Y Y, ZHOU L J, ZHU H K, et al. Modeling and Optimization of a Single-Drive Push-Pull Silicon Mach-Zehnder Modulator[J]. 2016, 4(4): 153-161. DOI: 10.1364/PRJ.4.000153
- [5] ZHU H K, ZHOU L J, WANG T, et al. 64 Gb/s Silicon QPSK Modulator with Single-Drive Push-Pull Traveling Wave Electrodes[EB/OL]. (2015-05-10)[2017-08-15]. https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=CLEO_SI-2015-SW3N.7
- [6] LI T T, WANG D, ZHANG J L, et al. Demonstration of 6.25 Gbaud Advanced Modulation Formats with Subcarrier Multiplexed Technique on Silicon Mach-Zehnder Modulator[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 19818-19823. DOI: 10.1364/OE.22.019818
- [7] WANG D, LI T T, ZHANG J L, et al. 100 Gbps, 160 km IM-DD Transmission of WDM Nyquist-16QAM Signal Based on Silicon Mach-Zehnder Modulator[J]. 2014 European

Conference on Optical Communication (EcoC). IEEE: USA, 2014. DOI: 10.1109/ECOC.2014.6964046

- [8] WANG M, ZHOU L, ZHU H, et al. Low-Loss High-Extinction-Ratio Single-Drive Push-Pull Silicon Michelson Interferometric Modulator[J]. Chinese Optical Letter, 2017, (15): 042501. DOI: 10.3788/COL201715.042501
- [9] ZHOU Y, ZHOU L, SU F, et al. Linearity Measurement and Pulse Amplitude Modulation in a Silicon Single-Drive Push-Pull Mach-Zehnder Modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(14): 3323-3329. DOI: 10.1109/JLT.2016.2567067
- [10] ZHOU Y, ZHOU L, WANG M, et al. Linearity Characterization of a Dual-Parallel Silicon Mach-Zehnder Modulator[J]. IEEE Photon Journal, 2016, 8(6): 7805108-7805116. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2616488
- [11] DONG P, XIE C J, BUHL L L, et al. Silicon In-Phase/Quadrature Modulator With On-Chip Optical Equalizer[C]// 2014 European Conference on Optical Communication (ECOC). USA: IEEE, 2015: 1191-1196. DOI: 10.1109/ECOC.2014.6963887
- [12] STRESHINSKY M, DING R, NOVACK A, et al. 50 Gb/s Silicon Traveling Wave Mach-Zehnder Modulator near 1300 nm[J]. Optics Express, 2013, 21(25):30350-30357. DOI: org/10.1364/OE.21.030350
- [13] DONG P, CHEN L, CHEN Y K. High-Speed Low-Voltage Single-Drive Push-Pull Silicon Mach-Zehnder Modulators[J]. Optics Express, 2013, 20(6): 6163-6169. DOI: 10.1364/OE.21.004116
- [14] YU H, PANTOUVAKI M, VERHEYEN P, et al. Silicon Dual-Ring Modulator Driven by Differential Signal[J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 6379-6382. DOI: 10.1364/OL.39.006379
- [15] LI R, PATEL D, SAMANI A, et al. An 80 Gb/s Silicon Photonic Modulator Based on the Principle of Overlapped Resonances[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 4900311. DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2702101
- [16] YONG Z, SACHER W D, HUANG Y, et al. U-Shaped PN Junctions for Efficient Silicon Mach-Zehnder and Microring Modulators in the O-Band[J]. Optics Express, 2017, 25(7): 8425-8439
- [17] XUAN Z, MA Y J, LIU Y, et al. Silicon Microring Modulator for 40 Gb/s NRZ-OOK Metro Networks in O-Band[J]. Optics Express, 2014, 22(23): 28284-28291. DOI: 10.1364/OE.22.028284
- [18] AKIYAMA S, BABA A T, IMAI M, et al. 12.5-Gb/s Operation with 0.29-V_{cm} V_{pi} L Using Silicon Mach-Zehnder Modulator Based-On Forward-Biased pin Diode[J]. Optics Express, 2014, 22(23): 2911-2923. DOI: 10.1364/OE.22.028284
- [19] DONG P, SINSKY J H, GUI C C. Coplanar-Waveguide-Based Silicon Mach-Zehnder Modulator Using A Meandering Optical Waveguide and Alternating-Side PN Junction Loading[J]. Optics Letters, 2016, 41(18): 4401-4404. DOI: 10.1364/OL.41.004401
- [20] VERMEULEN D, AROCA R, CHEN L, et al. Demonstration of Silicon Photonics Push-Pull Modulators Designed for

- Manufacturability[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(10): 1127–1129. DOI: 10.1109/LPT.2016.2532322
- [21] TZUANG L D, SOLTANI M, LEE Y H D, et al. High RF Carrier Frequency Modulation in Silicon Resonators by Coupling Adjacent Free-Spectral-Range Modes[J]. Optics Letters, 2014, (39): 1799–1802. DOI: 10.1364/OL.39.001799
- [22] DUBRAY O, MENEZO S. Simulation and Measurements of Chirp Penalties for Silicon Ring Resonator Modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(3): 280–283. DOI: 10.1109/LPT.2015.2494863
- [23] PANTOUVAKI M, YU H, RAKOWSKI M, et al. Comparison of Silicon Ring Modulators With Interdigitated and Lateral p-n Junctions[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, (19): 10.1109/JSTQE.2012.2228169
- [24] PATEL D, GHOSH S, CHAGNON M, et al. Design, Analysis, and Transmission System Performance of a 41 GHz Silicon Photonic Modulator[J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14263–14287. DOI: 10.1364/OE.23.014263
- [25] LIOW T Y, SONG J F, TU X G, et al. Silicon Optical Interconnect Device Technologies for 40 Gb/s and Beyond[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, (19): 8200312. DOI: 10.1109/JSTQE.2012.2218580
- [26] FERROTT T, BLAMPEY B, JANY C, et al. Co-Integrated 1.3 μm Hybrid III-V/Silicon Tunable Laser and Silicon Mach-Zehnder Modulator Operating at 25Gb/s[J]. Optics Express, 2016, 24(26): 30379–30401. DOI: 10.1364/OE.24.030379
- [27] DUAN G H, JANY C, LIEPVRE Le A, et al. Hybrid III-V on Silicon Lasers for Photonic Integrated Circuits on Silicon[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, (20): 6100213. DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2296752
- [28] QI N, XIAO X, HU S, et al. Co-Design and Demonstration of a 25-Gb/s Silicon-Photonic Mach-Zehnder Modulator With a CMOS-Based High-Swing Driver[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, (22): 3400410. DOI: 10.1109/JSTQE.2016.2602102
- [29] HUYNH T N, DUPIS N, RIMOLO-DONADIO R, et al. Flexible Transmitter Employing Silicon-Segmented Mach-Zehnder Modulator With 32-nm CMOS Distributed Driver[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 22(15): 5129–5136
- [30] LOCKWOOD D J, PAVESI L. Silicon Photonics II: Components and Integration [M]. Germany: Springer, 2011
- [31] DONG P, XIE C J, CHEN L, et al. 112-Gb/s Monolithic PDM-QPSK Modulator in Silicon [J]. Optics Express, 2012, 26(20): B624–B629. DOI: 10.1364/OE.20.00B624
- [32] DONG P, LIU X, CHANDRASEKHAR S, et al. 224-Gb/s PDM-16-QAM Modulator and Receiver based on Silicon Photonic Integrated Circuits[C]//2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC). USA: IEEE, 2013: 1–838
- [33] REED G T, MASHANOVICH G, GARDES F Y, et al. Silicon Optical Modulators[J]. Nature Photonics, 2010, (4): 518–526. DOI: 10.1038/nphoton.2010.179
- [34] WANG J, ZHOU L, ZHU H, et al. Silicon High-Speed Binary Phase-Shift Keying Modulator with a Single-Drive Push-Pull High-Speed Traveling Wave Electrode[J]. Photonics Research, 2015, 3: 58–62

作者简介



周林杰, 上海交通大学教授、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室博士生导师; 研究方向为集成光电子器件和芯片; 作为负责人主持并参与了“863”、自然科学基金等各类科研项目 20 多项; 2014 年获得自然科学基金优秀青年基金并入选上海市启明星计划, 2015 年入选首届青年长江学者, 2016 年获得牛顿高级学者基金; 在国际知名期刊上共发表学术论文 160 余篇(其中 SCI 论文 70 余篇), 在 OFC、OECC、ACP 等国际会议上做特邀报告 40 余次。



周砚扬, 上海交通大学电信学院电子工程系博士研究生; 研究方向为硅基调制器及其在光通信系统和微波光子信号处理中的相关应用。



陆梁军, 上海交通大学助理教授、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室硕士生导师、IEEE/OSA 会员等; 研究方向为光电子集成器件、硅基光电子集成芯片; 参与“973”计划、“863”计划、自然科学基金等多个项目; 已在全球知名刊物和会议上发表论文 40 余篇, SCI 收录 17 篇。

多维复用硅基集成光子器件

Silicon Photonic Devices for Wavelength/Mode/Polarization Multiplexing

储涛/CHU Tao¹
郭德汾/GUO Defen²
吴维轲/WU Weike¹

(1. 浙江大学, 浙江 杭州 310027;

2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

随着信息社会的高速发展,海量数据信息的传输和处理面临着越来越高的要求。为了更有效地利用已经架设完成的通信和传输网络,同时降低未建硬件网络的建设成本,减少硬件所占用的空间要求,复用和解复用技术一直是通信和传输领域技术发展的持续追求。在光通信系统中,由于光波在波长、偏振和模式等多个维度上具备携带不同信息的能力,因此光波的复用技术从波分复用(WDM)技术被提出以来得到了长足的发展和进步,特别是WDM已经被广泛应用,成为光通信的基本形式之一。随着数据传输对于容量的进一步需求,利用光波的偏振和模式完成复用也已经成为新的研究热点,并在相干通信和模式复用通信领域得到了关注,有望成为未来光通信的主要形式之一。随着技术的发展,光通信和数据传输即将进入一个技术手

收稿日期: 2017-08-05

网络出版日期: 2017-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(61575189、61635011); 国家重点研发计划(2016YFB0402505)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0030-04

摘要: 从波长、模式、偏振几个维度的复用/解复用和路由出发,分别提出了新颖的器件设计方法并制作了相应的硅基光子器件,包括:阵列波导光栅器件(AWG)/刻蚀衍射光栅器件(EDG)、模式分离耦合束器件、偏振分离耦合光栅、偏振分离/分离旋转器件。AWG可以采用一步刻蚀简单工艺制作形成,EDG插损得到大幅降低,模式分离器件带宽增大,插损也得到降低,偏振分离耦合光栅的耦合效率得到有效提升,偏振分离/旋转器件的插损和带宽也被显著改进。以上器件全部符合互补金属氧化物半导体(CMOS)-180 nm工艺标准,这些器件的研制工作为多维度光波复用/解复用处理及传输提供了先进的器件技术保障。

关键词: 波长复用/解复用; 模式复用/解复用; 偏振控制; 硅光器件

Abstract: In this paper, various silicon photonic devices designed for wavelength/mode/polarization multiplexing/demultiplexing are proposed, including arrayed waveguide grating (AWG) and etched diffraction grating (EDG), mode Mux/DeMux devices, polarization splitting grating coupler, and polarization splitting rotating device. With these novel devices, the following results can be achieved: (1) AWG could be formed by single step etching process; (2) EDG insertion loss is greatly reduced; (3) mode splitting device bandwidth increases, while the insertion loss is reduced; (4) the coupling efficiency of the polarization splitting grating coupler is effectively improved; (5) the insertion loss and bandwidth of the polarization splitting rotating device are also significantly improved. It is believed that the Mux/DeMux technologies on dimensions of wavelength/mode/polarization will be strongly supported by these silicon photonic devices, which are compatible with complementary metal oxide semiconductor (CMOS)-180 nm processing technologies.

Key words: wavelength Mux/DeMux; mode Mux/DeMux; polarization controlling; silicon photonic devices

段与方法更丰富多彩的多维度复用时代。

另一方面,各种复用技术的实现离不开相对应的复用与解复用器件。现在广泛商用的光电子器件基于传统的可编程逻辑控制器(PLC)以及化合物半导体材料平台,在大部分各自维度对应的复用/解复用器件上有了较为成熟的解决方案。然而,随着对光电子器件低成本、低能耗、高集成度要求的提高和相干通信等

新型通信方式的发展,硅基光电子集成器件由于其波导拐弯半径小,利于高密度集成以及可利用成熟的互补金属氧化物半导体(CMOS)产线技术超低成本批量生产,被普遍寄予厚望,成为构建下一代光子通信网络和数据互连网络乃至量子通信网络的理想器件。因此,在调制器等各种基础通信器件已成功利用硅基光电子集成技术研制开发的基础上,各种维度对应的复用/解复用器件也被希望

基于硅基光子学技术平台来开发,以实现光电子通信器件单片集成。

基于以上光复用技术的发展以及新型复用器件的研发要求,我们开展了多种对应各种维度的硅光复用解复用器件的开发。

1 波长复用解复用器件

波长复用是光通信和数据传输中最常用的复用技术,该技术的应用极大地提升了复用效率,为大容量通信的实现奠定了先进的技术基础。在系统中为了实现波长的复用和解复用,通常使用阵列波导光栅器件(AWG)、刻蚀衍射光栅器件(EDG)等波分复用器件。

1.1 AWG

AWG是最常用的波分复用器件之一,由于其可实现64路甚至更多的波长信道的分/合束,常被用于实现密集波分复用功能。传统的AWG多基于PLC石英波导器件,已经十分成熟并得到了广泛应用。然而,PLC器件的尺寸一般在几厘米以上,不利于系统集成,因此,基于绝缘衬底上的硅(SOI)基板的AWG研究也颇受重视。

AWG由输入输出波导、自由传输区域和阵列波导构成,硅基AWG器件的尺寸可以降低至几百微米。然而,高密度集成在另一方面也带来了串扰控制和波导间模式匹配等问题。在传统的设计中,对于和自由传输区域结合的波导,通常采用双层刻蚀的楔形波导结构,即利用楔形波导在平面方向增大阵列波导和自由传输区域的光场匹配的同时,采取套刻双层刻蚀形成垂直方向上的收束/扩散结构,增进光场匹配。然而,由于套刻存在对准误差,刻蚀存在深度误差,不可避免将带来器件结构的不确定性和成品率降低,也增加了制造成本。因此,我们从AWG自由传输区域和阵列波导的耦合特性和需要出发,通过利用抛物线型楔形波导以最

短的长度完成光场的收束/扩散,使阵列波导以更小的间距在自由传输区域边缘排列,在更大效率地接收衍射光的同时能有效控制波导间耦合串扰不至增大^[1-2]。采用以上的设计,通过一次性曝光刻蚀工艺制作的8×8硅基AWG与采用线性和指数型楔形波导AWG相比,串扰最大降低超过7 dB。信道间隔200 GHz和400 GHz的8×8硅基AWG插损分别最低达2.3 dB、2.4 dB,最小串扰达-20 dB、-25 dB,信道的3 dB带宽为0.9 nm、2.2 nm,性能指标和当时国际上采用套刻双层刻蚀的AWG的指标不相上下^[3],但是制作工艺却大为简化。

1.2 EDG

在数据中心的数据互连中,由于网络简单,信道数要求较少,EDG通常被认为是比较易于使用的波分复用/解复用器件。然而,基于SOI的EDG器件插入损耗通常达到3 dB以上。而复用和解复用器件在传输链路中配对使用,EDG的插损对于硅基光子传输链路的建立形成了障碍。

基于EDG的研究现状和应用上对于降低插损的急迫需求,我们从设计方法入手对EDG展开了研究。传统的EDG设计方法里,光栅参数的近似模拟计算使得分布在罗兰圆上的不同输出通道产生像差,对器件的性能产生影响。过往的研究虽然对光栅周期和朝向都做了优化,但是输出波导采用均匀分布方式,也没有考虑到多个波长输出可能需要的优化。我们创新性地提出了多点优化像差的方法,对多个波长、多个输出波导的位置分别进行计算,从根本上改变了EDG的设计手法^[4]。按此方法我们设计制作了1 550 nm波段的1×4的EDG器件,其插入损耗1~1.5 dB,串扰-30.4~-34.0 dB。插入损耗比以往的EDG器件降低了一半以上^[5],为EDG在硅光链路中的使用奠定了关键的技术基础。利用新加坡IME的CMOS-180 nm工艺,在直径20.32 cm

晶圆上的不同位置上制作的EDG也表现出很好的性能一致性。在晶圆中部和边缘的不同位置随机抽取的6个同样设计的EDG测试结果表明:所有器件各信道的插损都低于1.9 dB,器件串扰小于-26 dB,表明该器件具有非常好的设计冗余度和工艺适应性。

2 模式复用/解复用器件

模式复用技术作为新兴复用技术可以进一步提高光通信容量,低插损、低串扰、大带宽、大制作容差和小尺寸的模式复用/解复用器件是实现模式复用的关键。在保持绝热耦合器的大带宽、低插损和大容差的前提下,解决其器件长度过长的的问题,我们采用了捷径绝热的方法来优化器件的绝热性,设计验证了一系列性能优良的模式复用/解复用器件^[6]。

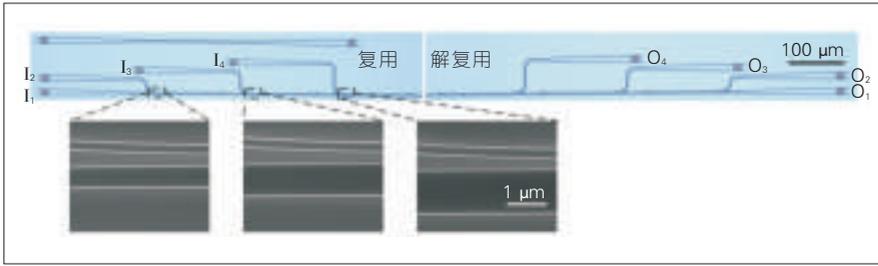
图1是横电波模式(TE₀)-TE₁-TE₂-TE₃(TE₀、TE₁、TE₂、TE₃分别代表电场平行于芯片方向的光波的0、1、2、3阶模式分量)共4个模式的模式复用/解复用器件的显微镜图片和部分扫描电镜图片。器件的测量结果如图2所示,a)-d)分别显示了TE₀、TE₁、TE₂和TE₃信道的传输频谱曲线。在1 500~1 600 nm的测量波长范围内,器件的最大传输损耗小于1.3 dB,并且不同信道间的串扰小于-23 dB。

3 偏振控制器件

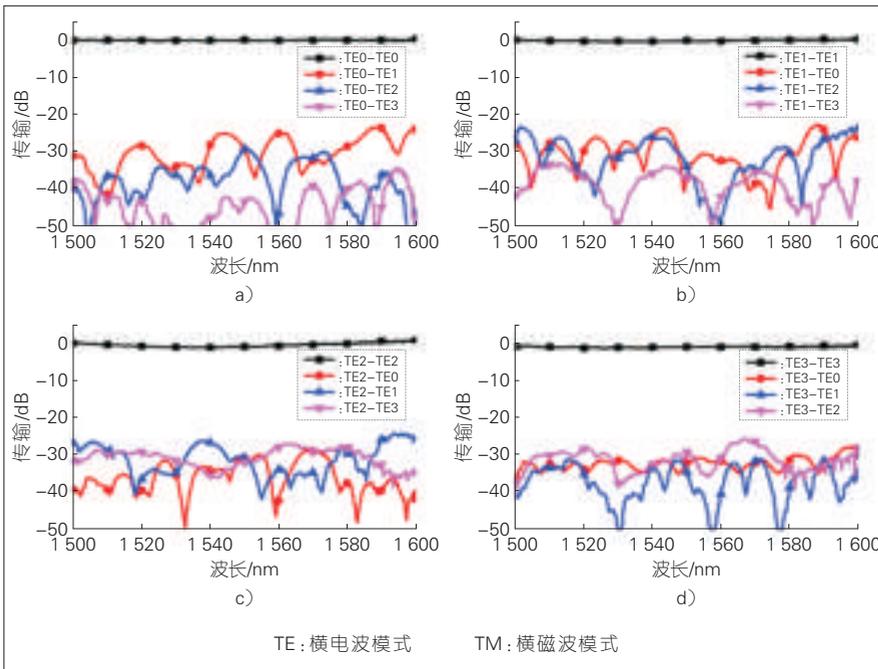
随着相干调制等高级格式调制传输方式以及量子通信的出现,光的偏振态作为光的基本形态之一成为增加复用形式的一种新维度,而各种偏振控制器件作为光通信中实现光的偏振态的分离、合束、旋转的关键器件,也越来越多的在SOI平台上被研究实现。

3.1 偏振分离光栅

通常硅波导与标准单模光纤的光场相差数百倍,平面耦合(通常使



▲图1 基于捷径绝热的4个模式的复用/解复用器件的显微镜照片和部分扫描电镜照片



▲图2 基于捷径绝热的TE0-TE1-TE2-TE3复用/解复用的测量结果

用光栅耦合器)是解决SOI片与光纤之间耦合问题的有效方式,但传统1D结构的光栅耦合器效率受光偏振态的影响非常严重。为了解决平面耦合偏振相关性的问题,一种2D结构的偏振分集光栅耦合器被研制出来,它可以将光纤中任意偏振态的光耦合到垂直的两个波导上,可以在完成光纤与芯片的耦合的同时完成光偏振态的分离,不但减少了片上制作其他偏振处理器件的必要,并且克服了单偏振光栅偏振相关性强的弱点,非常适合在接收芯片部分应用。我们设计制作的偏振分集光栅耦合器使用IME-CMOS工艺制作,其测试结果见图3,耦合效率达到-3.3 dB,偏振相关损耗1.2 dB^[7]。耦合效率仅亚

于Luxtera在2016年发表的结果。

3.2 偏振分束器

同样基于捷径绝热的模式转换,

我们设计并制作了大带宽、高消光比的片上偏振分束器件。相比于以往文献报道的器件不能在大带宽范围内同时实现高消光比,如图4所示,我们制作的器件在1520~1620 nm波长范围内插损小于0.8 dB,消光比大于25 dB。器件由3个具有相同参数的捷径绝热的模式转换器件组成,工作原理为横磁波模式(TM0)光通过模式转换改变端口输出,而TE0则不会经过模式转换直接输出。在整个1520~1620 nm测量范围内,TE0和TM0最大的插损大约为0.8 dB,串扰小于-25 dB。

3.3 偏振旋转分离器

为实现偏振分集功能,我们设计并制作了高性能的偏振旋转分离器,器件结构包括一个粒子群优化的双层楔形结构和一个基于捷径绝热的模式转换分离器。工作原理为TM0经过模式转换分离器转换成TE0并改变端口输出;TE0直接从另一端口输出。我们在O波段设计制作的偏振旋转分离器在1260~1340 nm波长范围内,器件插损小于1 dB,串扰小于-22 dB,具体结果如图5所示。

4 结束语

随着大数据时代海量数据的传输和通信需求越来越大,光波在多维度的复用和解复用技术必然会在

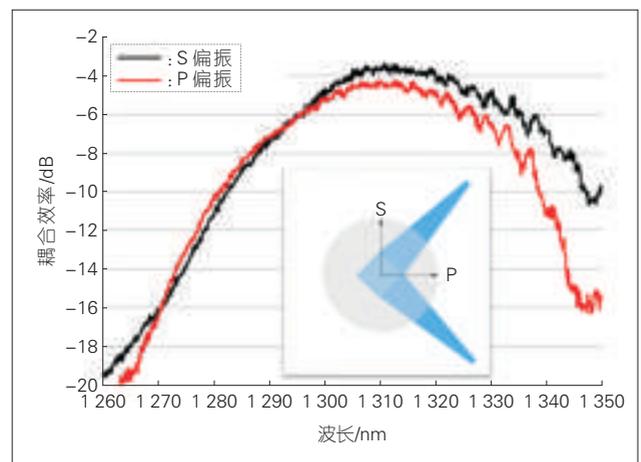
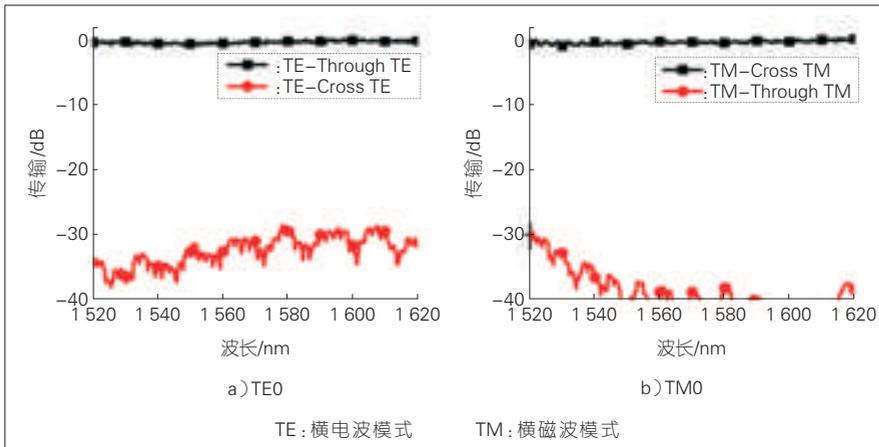
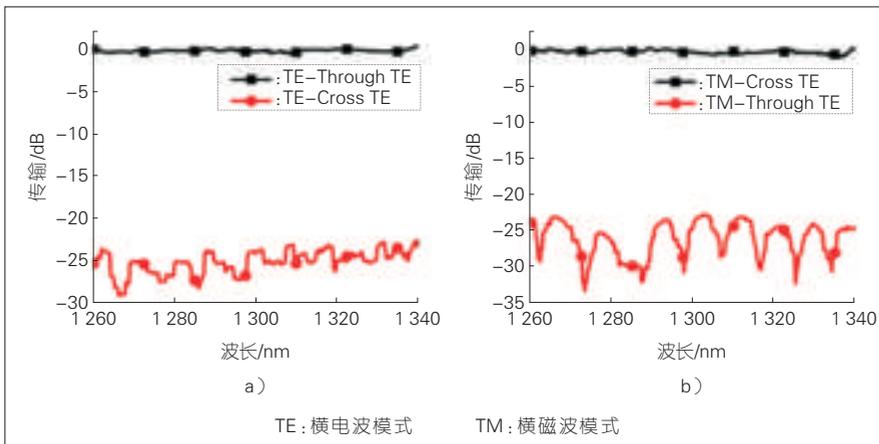


图3▶ 偏振分离耦合光栅测量



▲图4 偏振分束器件测量结果



▲图5 波段的偏振旋转分离器件测量结果

多种应用场景越来越受到关注。我们从波长、模式、偏振等维度复用的实际研究和应用出发,研制了对应各种复用功能的多种硅基光电子集成器件,可以完成光通信和数据传输的相应功能,并且具有在CMOS工艺线上批量生产的工艺可行性,相信在将来高密度集成的光通信多维复用体系中可以得到广泛的应用。

致谢

本论文中,波长复用解复用

AWG/EDG器件的研究由富士通研究开发有限公司的叶彤博士和华为技术有限公司的付云飞完成,在此对他们谨致谢意!

参考文献

- [1] YE T, FU Y F, QIAO L, et al. Low-Crosstalk Si Arrayed Waveguide Grating with Parabolic Tapers[J]. Optics Express, 2014,22(26): 31899-31906
- [2] FU Y F, YE T, TANG W J, et al. Efficient Adiabatic Silicon-On-Insulator Waveguide Taper[J]. Photonics Research,2014: 2(3):A41-A44. DOI: 10.1364/PRJ.2.000A41
- [3] WANG J, SHENG Z, LI L, et al. Low-Loss

and Low-Crosstalk 8×8 Silicon Nanowire AWG Routers Fabricated with CMOS Technology[J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9395-9403

- [4] SCIANCALEPORE C, LYCETT R, DALLERY J, et al. Low-Crosstalk Fabrication-Insensitive Echelle Grating Demultiplexers on Silicon-On-Insulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(5): 404-497
- [5] YE T, CHU T. Low-Loss and Low-Crosstalk Si Etched Diffraction Gratings with Multi-Point Iterative Optimization (oral)[C]// the 13th International Conference on Group IV Photonics. China: GFP,2016: ThD5
- [6] GUO D F, CHU T. Silicon Mode (de) Multiplexers with Parameters Optimized Using Shortcuts to Adiabaticity [J]. Optical Express,2017, (25): 9160-9170. DOI: 10.1364/OE.25.009160
- [7] WU W K, LIN T H, CHU T, et al. CMOS-Compatible High Efficiency Polarization Splitting Grating Coupler near 1310nm[C]// Asia Communications and Photonics Conference. China: OSA, 2016: AS2F.4. DOI: 10.1364/ACPC.2016.AS2F.4

作者简介



储涛,浙江大学信息与电子工程学院教授;主要研究领域为集成光电子学和硅基光子学;先后主持国家自然科学基金面上/重点项目、国家重大科学研究计划、企业合作项目等10余项;已发表论文80余篇,被SCI/EI检索70余篇。



郭德汾,中国科学院大学博士研究生(浙江大学联合指导);主要研究领域为硅基偏振控制和模式复用解复用光子器件;先后参加国家自然科学基金面上/重点项目、企业合作项目数项;已发表论文3篇,其中被SCI/EI检索3篇。



吴维轲,浙江大学信息与电子工程学院助理工程师;主要研究领域为单偏振/多偏振硅基耦合光栅器件;先后参加国家自然科学基金面上/重点项目、企业合作项目数项;已发表论文1篇,其中被SCI/EI检索1篇。

基于高Q值氮化硅微环反射镜的窄线宽单模光纤激光器

Narrow Linewidth Single Frequency Fiber Laser Based on High-Q Silicon Nitride Microring Reflector

章元珏/ZHANG Yuanjue

李渔/LI Yu

陈明华/CHEN Minghua

(清华大学, 北京 100084)

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0034-004

摘要: 实现了一种基于片上高Q值氮化硅(Si₃N₄)微环反射镜的单模光纤激光器。利用微环反射镜的窄线宽特性,可以在使用较长增益光纤的同时保证激光的单模激励。由于激光谐振腔的加长,可以得到更好的线宽特性。实验中,采用长度为12 cm的掺铒光纤作为增益介质。通过在掺铒光纤的两端分别使用布拉格光栅(FBG)和微环反射镜,构建了一个基于法布里-珀罗(FP)谐振效应的光纤激光器,微环反射镜的Q值达到 2.5×10^5 。获得了线宽为8 kHz的单频激光输出。

关键词: 光纤激光器;集成光器件;微环;窄线宽

Abstract: A single frequency erbium-doped fiber laser with an on-chip high-Q silicon nitride (Si₃N₄) micro-ring reflector is demonstrated in this paper. As a result of the narrow bandwidth of the micro ring cavity, longer gain media can be employed and single-frequency lasing can still be realized, which is also beneficial for better linewidth performance. In our demonstration, the compact laser cavity is composed of an on-chip micro ring with a Q value of up to 2.5×10^5 , a 12 centimeters erbium doped fiber and a fiber Bragg grating (FBG). The linewidth of the laser output is about 8 kHz.

Keywords: fiber laser; integrated optics devices; micro ring; narrow linewidth

Ball等人制作了第一台基于布拉格反射镜构建的1 550 nm单模光纤激光器^[1]。数年后,又发展出分布式布拉格反射镜(DBR)的激光器结构。由于这种结构简单、紧凑并且具有很高的鲁棒性,因此近年来基于DBR结构的单模光纤激光器尤受青睐^[2]。具有窄线宽的单模激光器在各个领域中都有广泛应用,如相干光通信、激光雷达(LIDAR)和最近的引力波探测等。

在使用布拉格光纤光栅(FBG)构建光纤激光器的研究中,已经实现了千赫兹的窄线宽输出^[3],在文献[4]的研究中,其线宽甚至达到百赫兹量级。但是,由于FBG的带宽通常大于0.1 nm,这就要求激光谐振腔必须足够短(即纵模间隔足够大)来避免产生多纵模,通常此类激光器的腔长在2 cm以下。为了保证激光腔有足够的增益以提高输出光功率,必须使用

具有很高掺杂浓度的增益光纤,此类光纤通常很难获得。在文章中,我们使用硅基微环反射镜来代替窄带FBG,其中微环反射镜的Q值达 2.5×10^5 ,带宽仅为800 MHz。使用高Q值微环作为反射镜的激光器,在单纵模工作时可以配置更长的增益光纤。文章中我们提出的激光器使用的掺铒光纤的长度为12 cm,比使用FBG的激光器高出了6倍。根据Schawlow-Townes^[5]的相关公式,较长的谐振腔可以进一步改善线宽特性。最终,我们成功地利用片上微环反射镜和FBG构建了一个单模窄线宽激

光器。

1 基于微环的单模窄线宽激光器原理和设计

1.1 高Q值微环反射镜

TriPleX™氮化硅波导技术是目前主流的与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容的集成光子平台。它具有损耗低,结构紧凑的优势。因此,我们可以采用这种技术实现具备高Q值、高反射率特性的硅基片上微环反射镜。TriPleX™波导技术的3类典型结构之一的双条形波导结构如

收稿日期: 2017-08-05
网络出版日期: 2017-09-04

图1a)所示。该波导在水平方向上的宽度为 $1.2\ \mu\text{m}$ ，垂直方向上由3层薄膜构成，各层依次为：氮化硅层、二氧化硅层和氮化硅层，这3层薄膜的厚度分别为： $170\ \text{nm}$ 、 $500\ \text{nm}$ 和 $170\ \text{nm}$ 。该波导的传输损耗低至 $0.1\ \text{dB/cm}$ ，弯曲损耗在波导弯曲半径超过 $70\ \mu\text{m}$ 时就可以忽略不计。图1b)显示了该波导所支持的横电波模式(TE₀)的电场分布图，这个模式在真空波长为 $1\ 550\ \text{nm}$ 波长处的有效折射率为 1.535 ，群折射率为 1.715 。此外，针对TriPlex™波导平台的光纤耦合器，对TE₀模式进行了专门设计，使其不支持横磁波模式(TM₀)的传输，具有高达 $20\ \text{dB}$ 的偏振抑制比。

为了实现窄线宽的单模激光器，在设计微环反射镜时，主要应考虑以下3方面的特性：自由谱区(FSR)、反射率和Q值。首先，为了保证单模激光的产生，微环的FSR必须大于FBG的带宽。通常，光纤光栅的反射带小于 $1\ \text{nm}$ ，我们可以通过式(1)计算出微环反射镜的半径：

$$FSR = \lambda^2 / (2\pi R n_g) \quad (1)$$

其中， λ 为中心波长， R 为微环半径， n_g 为波导的群折射率。当FSR的值为 $1\ \text{nm}$ ， λ 为 $1\ 550\ \text{nm}$ ， n_g 为 1.715 时，通过计算可以得知，微环的半径必须小于 $233\ \mu\text{m}$ 。另一方面，半径越小的微环反射镜所实现的整体器件尺寸也就更小。因此，在满足弯曲损耗可以忽略的条件下应尽可能地减小微环的半径。最终，我们选择 $125\ \mu\text{m}$ 这样一个典型值作为微环反射镜的半径。由公式(1)计算可得，此时微环反射镜的FSR约为 $2\ \text{nm}$ 。

微环反射镜的Q值与激光器的腔长相关，构建光纤激光器时，在满足激光器的单模工作条件下，Q值越大，可以选用的增益介质更长。在其他参数不变的情况下，微环的Q值与总线波导和微环间的功率耦合系数 k 成反比。为了获得较大的Q值，应该采用较小的 k 值。但 k 值同时也决定

着微环反射镜的反射率， k 值越小，反射率越低。图2a)中显示了功率耦合系数 k 值与Q值和反射率的关系。考虑到Q值最终决定了激光器谐振腔的腔长，反射率必须足够高以避免腔内损耗太大，我们需要选取一个合适的 k 值。光纤和芯片之间的耦合损耗估计约为 $3\ \text{dB}$ ，即光往返一周损失 $6\ \text{dB}$ 。除此之外，其他的损耗还包括FBG透射，单模光纤与掺铒光纤间的耦合损耗等。在具体设计时，我们用额外的 $3\ \text{dB}$ 来囊括这些损耗。由于候选的掺杂光纤增益系数为 $1\ \text{dB/cm}$ ，所以光纤的长度至少要有 $9\ \text{cm}$ ，相对的Q值必须足够大，否则激光将无法单模工作。

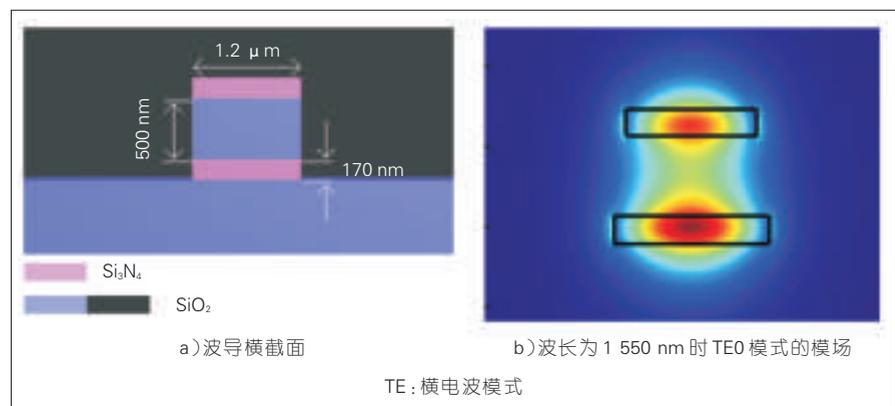
综合以上的情况考虑，我们选取 k 值为 0.008 ，相应的反射率不小于 $-1\ \text{dB}$ ，Q值约为 3×10^5 。与 k 值相关联的微环物理参数为总线波导和微环之间的间隔，它们的关系具体如图2b)中所示，当 k 为 0.008 时，间隔大约

为 $1\ 240\ \text{nm}$ 。

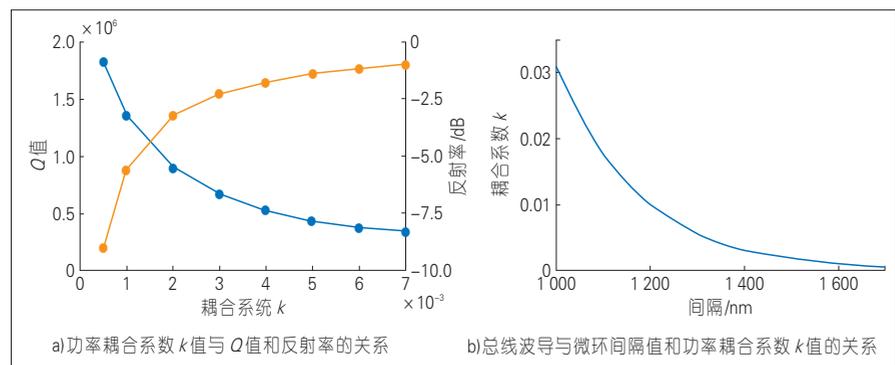
1.2 单模和窄线宽

在我们的激光器结构中，一端为传统的光纤光栅反射单元，另一端为高Q微环反射镜，因此它的谐振腔可以看成由2个腔级联而成：一个是由芯片反射单元和光纤光栅构成的法布里-珀罗(FP)腔，其腔损包含了光纤与芯片间的耦合损耗；另一个则是前文讨论的高Q微环腔。当激光谐振腔长为 $13\ \text{cm}$ 时(铒与光纤光栅的长度之和)，我们可以得到整体谐振腔的透射率谱如图3所示。图中显示，叠加带宽为 $800\ \text{MHz}$ 的高Q微腔滤波器后，其最近边模可被抑制 $3\ \text{dB}$ 以上。当激光激光时，腔内存在的模式竞争将进一步抑制边模振荡。因此，我们可以判断图3情况下的激光腔将能产生单模的激光输出。

根据Melvin Lax^[6]提出的修正的Schawlow-Townes公式，在只考虑量子



▲ 图1 TriPlex™波导平台的双波导结构



▲ 图2 微环设计相关参数

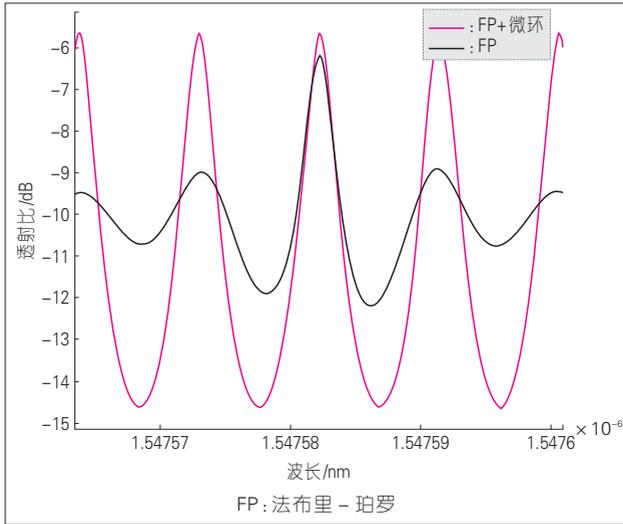


图3 在腔长为13 cm时法布里-珀罗腔和级联腔的透射谱

噪声的条件下,激光器的线宽可以通过式(2)计算:

$$\Delta v_{laser} = \pi h\nu (\Delta v_c)^2 / P_{out} \quad (2)$$

其中, $h\nu$ 为光子能量, Δv_{laser} 和 Δv_c 分别为激光器和冷腔的半高全宽线宽, P_{out} 为腔内的光功率。冷腔线宽 Δv_c 的计算如式(3):

$$\Delta v_c = v_0 / Q_c = \beta c / 2\pi n L \quad (3)$$

其中, β 为单程损耗, n 为增益介质的折射率, L 为线性腔腔长。由于光纤激光器腔长远大于半导体激光器,所以具有更好的线宽特性。通常来说,光纤激光器的线宽在千赫兹量级,而半导体激光器为兆赫兹量级。为了满足单模激射条件,光纤激光器的腔长通常被限制得很短。从上面计算激光线宽的式子可以看出,与激光器的输出功率相比,激光器的腔长对激光器线宽的影响更大。FBG的带宽通常大于0.1 nm,而微环反射镜可以取得更小的带宽。尽管芯片和光纤的耦合会带来较大的损耗,但通过合理的设计,窄线宽带来的优势可以弥补损耗增大带来的负面影响并进一步减小线宽。

当然,噪声的引入同样会恶化激光器的线宽特性,此类噪声包括:泵浦功率起伏,晶体温度起伏等,一个紧凑的激光器结构将会减轻这些噪

声的影响。

2 激光器实验设置和结果

将微环反射镜与普通单模光纤耦合后,在一端测量其反射谱,结果如图4所示。测量得到的微环参数与设计时存在一些差别,这是因为工

艺上的误差造成的。从放大图可以看出微环反射镜的 Q 值为 2.5×10^5 。腔内的激光从一端的FBG处透射输出,FBG的反射率为90%。FBG的反射率同时影响激光腔的损耗和从激光腔内输出的光功率大小,因此可通过对FBG反射率进行优化进一步提高激光器性能。

光纤激光器的结构如图5所示。与传统的DBR结构不同,我们用微环反射镜替代一端的FBG。由于微环反射镜的窄线宽特性,允许我们使用较长的增益介质。在实验中,我们选用了12 cm长的LIEKKITM Er110-4/125掺铒光纤,该光纤在1530 nm处的峰值核心吸收系数为110 dB/m,数值孔径为0.2,在1550 nm处的模场直径为6.5 μ m。为了构建线性谐振腔,将一个FBG熔接在EDF的一端,EDF的另一端与芯片反射镜耦合。微环与光纤之间的耦合损耗大约为4 dB,往返将有8 dB的损耗,这是激

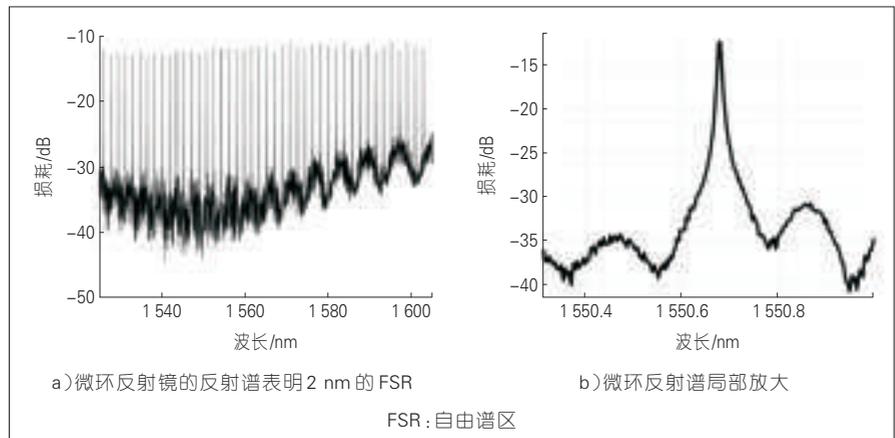


图4 微环的反射特性

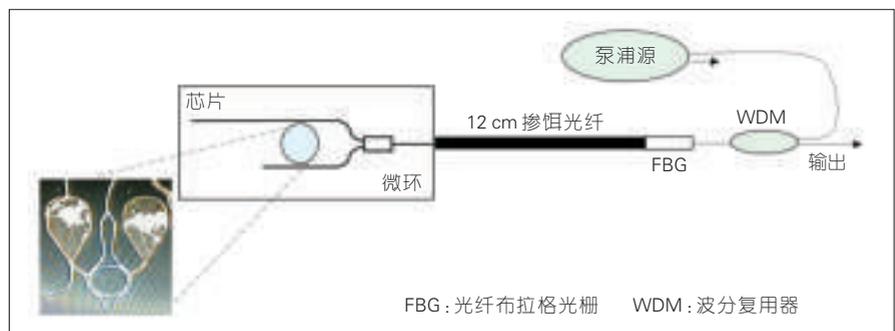


图5 光纤激光器结构

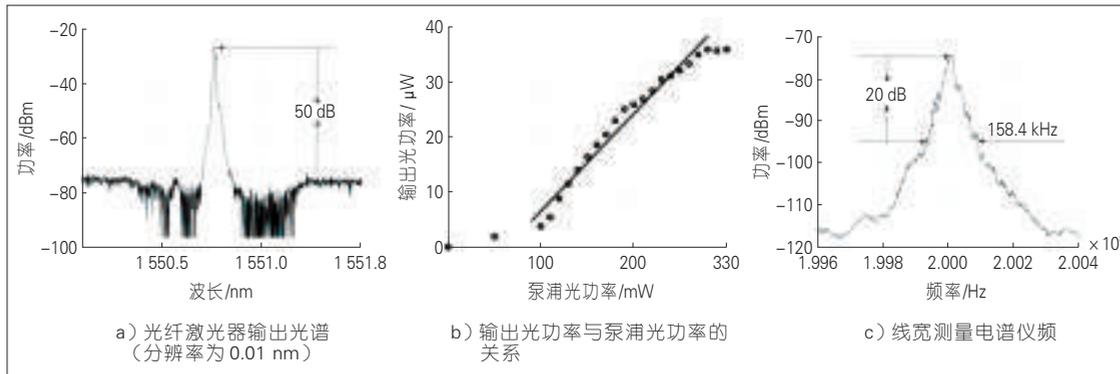


图6 激光器实验结果

光腔的主要损耗。微环反射镜的FSR为2 nm,大于FBG的带宽。为了保证激射,我们可以在芯片上的电极上外接电流源,调节反射镜的反射峰,从而使得反射峰落在FBG的反射带内。

激光器实验结果如图6所示。最终,我们获得了35 μW功率的1550 nm激光输出,信噪比大于50 dB。该激光器的泵浦阈值功率为100 mW,当泵浦功率达到280 mW时,激光器渐趋饱和。由于线性腔的损耗较大,加之增益介质提供的增益不足,导致最后的输出功率比较低。我们使用自差拍方法来测量激光线宽。输出激光通过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后,经由一个带通滤波器过滤带外噪声,然后分为两束。其中一束经由声光移频器移频200 MHz,另一束则经过5 km光纤的延迟。之后,将两束光拍频的结果输入光谱仪中分析。为了推断线宽的数值,我们考察峰值以下20 dB处的线宽。从电频谱中观察到20 dB处的线宽为158.4 kHz,在假设激光器线宽满足洛伦兹线型前提下,相应的3 dB线宽为8 kHz。

3 结束语

我们成功实现了高Q值微环反

射镜,并基于微环反射镜构建了一个窄线宽光纤激光器,得到了8 kHz的激光输出。采用更高增益的增益介质,并减少耦合损耗,可以有效提高激光器的输出和线宽性能。由于微环还具有可调谐的特性,因此可以尝试构建可调谐激光器。随着硅基光子学的进一步发展,片上的光系统将会有更多的功能和应用。如果将光纤激光器的输出端设计在芯片上,该激光器可以为片上后端的光处理系统提供光源。

致谢

本文实验得到了清华大学电子工程系杨益协助,相关研究也得到了中兴通讯股份有限公司的资助,在此表示感谢。

参考文献

- [1] BALL G A, MOREY W W, GLENN W H. Standing-Wave Monomode Erbium Fiber Laser[J]. IEEE Photonics Society, 1991, 3(7): 613 - 615. DOI: 10.1109/68.87930
- [2] FU S J, SHI W, FENG Y, et al. Review of Recent Progress on Single-Frequency Fiber Lasers[J]. 2017, 34(3): A49-A62. DOI: 10.1364/JOSAB.34.000A49
- [3] SPIEGELBERG C, GENG J H, HU J D, et al. Low-Noise Narrow-Linewidth Fiber Laser at 1550 nm (June 2003)[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 57-62. DOI: 10.1109/JLT.2003.822208
- [4] MO S P, LI Z B, HUANG X, et al. 820 Hz

- Linewidth Short-Linear-Cavity Single-Frequency Fiber Laser at 1.5 μm [J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(3): 035101
- [5] SCHAWLOW A L, TOWNES C H. Infrared and Optical Masers[EB/OL].(1958-08-26) [2017-08-01]. <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.112.1940>
- [6] LAX M. Classical Noise. V. Noise in Self-Sustained Oscillators[J]. Physical Review Letters, 1967, 160(2):290

作者简介



章元珏,清华大学电子工程系硕士研究生;研究方向为光电子技术,主要研究基于光子集成芯片的光纤激光器技术。



李渔,清华大学电子工程系博士研究生;研究方向为集成光子技术,主要研究基于硅集成的新型片上光子系统技术。



陈明华,清华大学电子工程系教授、博士生导师;研究方向为片上光子微系统、微波光子学和高速光信号处理技术。

25 Gbit/s CMOS 直接调制 DFB 激光器驱动电路

A 25 Gbit/s CMOS Directly Modulated DFB Laser Driver Circuit

石泾波/SHI Jingbo^{1,3}
祁楠/QI Nan²
Patrick Yin CHIANG¹

(1. 复旦大学, 上海 201203;
2. 中科院半导体研究所, 北京 100013;
3. 光梓信息科技(上海)有限公司, 上海 201203)
(1. Fudan University, Shanghai 201203, China;
2. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100013, China;
3. PhotonIC Technology (Shanghai) Co., Ltd, Shanghai 201203, China)

1 激光器驱动电路概述

随着物联网、大数据和云计算技术的飞速发展, 数据通信的带宽呈现出爆炸式的增长, 而传统的电互连技术已经无法满足高速信息传输的需求。在此背景下, 为了实现信息更高速率的传输, 一种利用光纤作为传输介质, 光信号作为信息载体的通信方案即光互连应运而生。光互连可以理解为一光通信技术在短距离场景替代传统的电通信技术的一种实现形式, 具备光通信的所有技术优点, 但要求更高性能的集成化、低功耗、低成本。总之, 光互连能够实现超低功耗、长距离、超高速、高密度的数据通信, 同时还具备无电磁干扰、短延时、长寿命、安全可靠等特点。因此, 光互连技术代表了未来数

收稿日期: 2017-08-02
网络出版日期: 2017-09-06

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0038-005

摘要: 提出了一个基于互补金属氧化物半导体(CMOS) 65 nm工艺、可用于100 G直接调制光互连系统的激光器驱动电路, 此电路可以以差分形式驱动分布反馈式(DFB)激光二极管(LD)并使其在25 Gbit/s的速率下工作。电路采用了预加重技术即通过电容耦合的方式将一系列精确控制的脉冲信号输出到负载, 从而减小由于阻抗不匹配所导致的数据损耗。此外, 电路还包括了线性连续时间均衡(CTLE)电路和并联电感峰化电路来扩展信号的带宽。测试结果表明: 此驱动器电路可以为激光器提供60 mApp的调制电流和60 mA的偏置电流(DC), 获得1.2 mW光输出功率, 电路的功耗为480 mW。同时, 还观测到了25 Gbit/s的眼图, 消光比为4.4 dB和抖动2.9 ps。

关键词: 直接调制; DFB驱动电路; 电容耦合

Abstract: The laser drive circuit in 65 nm complementary metal oxide semiconductor (CMOS) is proposed in this paper, which can be used for 100 G direct modulation optical interconnection system. This circuit can drive distributed feedback (DFB) laser diodes (LD) to operate in differential forms at a rate of 25 Gbit/s. To suppress the data reflection due to discontinuous loading impedance, a shifted pulse pre-emphasis technique is proposed, which precisely generates the pulse from a tunable delay line, and delivers it to the load through capacitive coupling. Linear continuous time linear equalization (CTLE) and inductive shunt peaking are adopted to further extend the signal-path bandwidth. Measurement results show that the driver can provide 60 mApp modulation current with additional 60 mA direct current (DC) bias to the laser, which leads to 1.2 mW optical output power, and 480 mW power consumption. The 25 Gbit/s clean eye-diagrams is also observed, with 4.4 dB extinction rate (ER) and 2.9 ps jitter.

Key words: directly modulated; DFB driver; capacitively-coupled

据通信技术的发展方向。

光互连由于其应用场景对低功耗、高密度的超要求, 其技术的关键和核心是包含集成光电子技术在内的集成电路技术^[1]。具体包含了高速激光器芯片技术、光电探测芯片技术、集成驱动电路芯片技术、集成光波导技术、集成光电调制解调技术、集成数字信号处理技术和特种光纤

技术等。

作为一种最新定义出来的协议, 100GBase-LR4可以覆盖10 km以上的光纤传输距离^[2-3], 对目前数据中心中光纤传输的应用具有特别的意义, 因此成为当下研究的热点。图1为一个典型的四通道100GBase-LR4光电收发机系统的结构示意图, 通过传输光纤, 波分复用(WDM)发射或者接

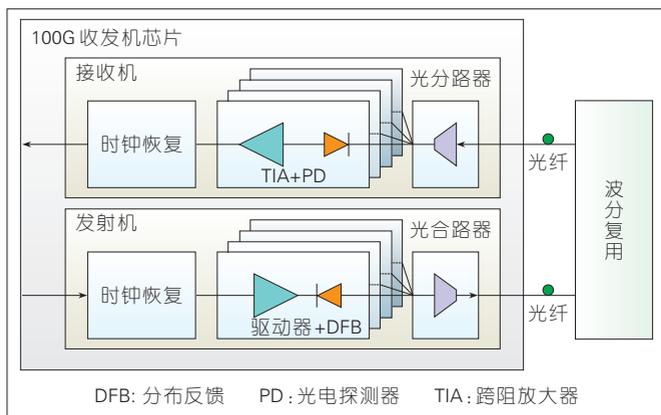


图1 100GBase-LR4 系统结构示意图

收4个波长间隔为5 nm的相干光,完成与收发机芯片间的信号的交互;收发机芯片主要包括接收机和发射机两部分,其作用主要是通过光电探测器(PD)或激光二极管(LD)来接收或发射光信号,信号的处理主要是由与这两个光电转换器件相连电路即跨阻放大器和激光器驱动电路来完成,这两个芯片可以说是整个发射机芯片的两个核心电路。

然而在100GBase-LR4系统中,出于传输距离所需的高输出光功率及低色散的要求,所使用的激光的波长为1 310 nm,光纤为单模光纤。这就要求系统中所使用的激光二极管为分布反馈(DFB)激光二极管,而非其他光互连系统所常用的垂直腔面发光激光二极管(VCSEL)。这也就对激光驱动器电路的设计提出了更高的要求,更具挑战性,主要表现在以下几个方面:

(1)偏置电流。为了使激光二极管工作在线性区,需要将其偏置在一个特定的值之上(这个特定的值即为激光二极管的阈值 I_{th}),因为一旦电流小于阈值,激光器工作在饱和区,输出光功率基本保持不变,无法调制光功率,因此驱动器电路必须确保激光器的偏置电流永远大于其阈值电流;然而,阈值电流并不是不变的,其随着温度的变化而增加,激光二极管在连续工作一段时间后其温度又会显著升高从而使阈值发生变化,如图2a)所示,因而必须将激光二极管偏

置在一个较大的电流值,保证其即便在高温时仍可以工作在线性区。

(2)调制电流。在100GBase-LR4系统中,光信号在光纤中的传输距离更长,达到10 km以上,因此就需要驱动电路具有更高的调制电流,来获得高光功率实现长距离传输。图2b)为驱动电路的偏置电流 I_{bias} 、调制电流 I_{mod} 与光功率的对应关系。通常来说,偏置电流是为了保证激光器工作在线性区,而调制电流的大小则决定了激光器的额输出光功率。

(3)传输速率。对于100GBase-LR4系统来说,要求单通道的发射机或者接收机的传输速率为25 Gbit/s,并且同时满足系统对偏置电流和调制电流的要求,即要求电路可以驱动激光二极管工作在较高的偏置电流和调制电流的同时可以实现上述的传输速率,因而对设计提出了更为严格的要求。因为更高的工作电流就需要更大规模的晶体管电路,会加剧电路的寄生效应从而降低系统带宽。对于一个基于互补金属氧化物

半导体(CMOS)工艺设计的发射机芯片来说,如何在实现高的偏置电流和调制电流的同时,满足系统对传输速率的要求,是激光器驱动电路设计需要考虑的最重要的因素。

2 激光器驱动电路设计

激光器根据调制方式的不同分为直接调制和间接调制。相对于前者,间接调制需要外接一个调制器,会额外增加发射机芯片的成本,与采用CMOS工艺设计的初衷即降低成本提高集成度不符,因而不在此文中进行讨论。而直接调制激光器驱动电路根据输出极与激光二极管的连接方式可以将驱动电路分为直流耦合驱动器和交流耦合驱动器。

2.1 直流耦合驱动电路

图3a)是直流耦合驱动电路示意图,驱动器电路的输出通过两个电阻分别和激光二极管的阴阳极相连,激光二极管的阴极被直接偏置在电源,通过在阳极接入一个电流源来控制直流偏置电流,调制电流则由左侧驱动电路中的晶体管的尾电流决定。直流耦合驱动电路结构简单,只需要将激光二极管偏置在一个较低的值(大于激光二极管的阈值即可)即可实现其正常工作。

不过,直流耦合驱动电路的问题在于:当驱动激光二极管在一个较高的速率时则难以实现较高的调制电流,比如在电源电压为 V_{DD} 时,对于2.5 Gbit/s的数据率,电流从偏置上升到峰值的调制时间为100 ps,调制电

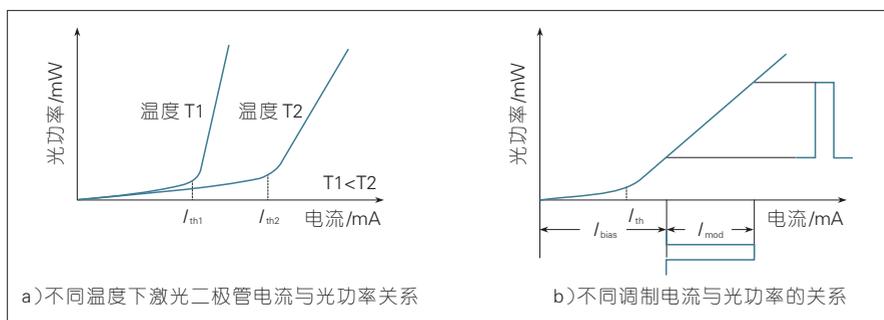
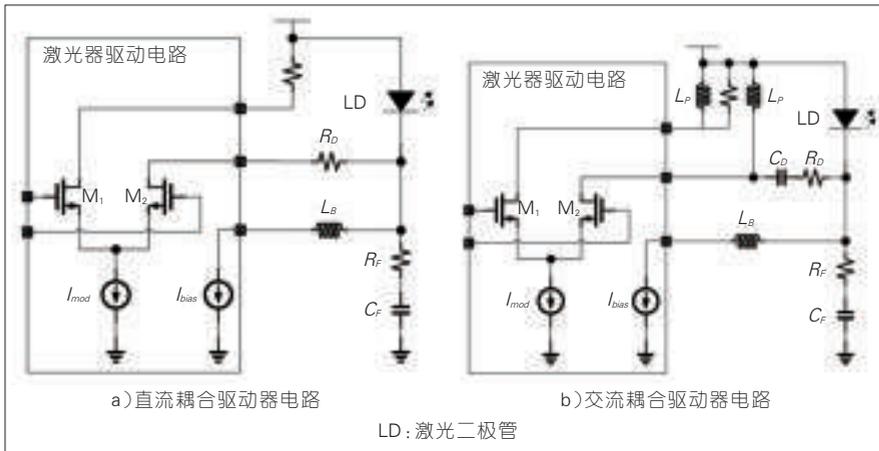


图2 激光二极管电流与光功率关系



▲图3 常见的激光驱动器电路结构

流 I_{mod} 为 60 mA, 二极管的等效电阻 R_D 为 20Ω (包括封装电阻), 假设波形对称, 则激光二极管电阻 (RD) 两端的瞬时的电压变化为:

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

其中, L 为激光二极管的电感 (主要包括 Bonding 线的寄生电感), 当 $L=1.0$ nH 时, 封装好的激光二极管的开启电压为 1.6 V, V_L 的大小为 0.6 V, 驱动器输出端的瞬时电压则为 $V = V_{DD} - 0.6 - 1.6 - (I_{mod} R_D)$, 因此对于这个速率和调制电流来说, 很难用 3.3 V 的电源来实现。

2.2 交流耦合驱动电路

交流耦合驱动器可以改善上述问题, 其电路结构如图 3b) 所示, 其与直流耦合驱动电路的区别在于: (1) 激光二极管两端的交流电压与等效电阻有关, 大小等于调制电流与等效电阻之积; (2) 瞬态电压等于等效电阻乘以调制电流一半。

由电路分析可得: 流过电容 C_O 的电流的平均值为零并且峰值的摆幅为 I_{mod} , 因此激光二极管的输出为峰值功率时, 有一半的电流流入此电容, 低功率时又有一半的电流从此电容流出。因此, 流入激光二极管的电流则为:

$$I_L = I_{bias} \pm \frac{1}{2} I_{mod} \quad (2)$$

相对于直流耦合驱动器电路, 交流耦合结构的设计余量更大, 不过却引入了额外的电容和电感, 对于高速路径来说, 可能会导致信号失真, 因此对电路的匹配的要求更高。此外, 交流耦合结构中的耦合电容会对系统的抖动有一定的影响, 需要将其电容值设置的足够大来降低此影响, 但这同时也会对驱动器电路的带宽产生影响, 在设计时要充分考虑以上因素, 增加了设计难度。

2.3 25 Gbit/s 激光器驱动电路

上述的直流耦合和交流耦合两种连接方式各有特点, 不过都无法将其照搬到 100GBase-LR4 系统中的激光器驱动电路的设计中。以 2.1 中描述的情况为例, 在相同的电源和调制电流的情况下, 即便直流耦合驱动器电路的带宽可以满足 25 Gbit/s 的传输速率的要求, 此时 V_L 的大小为原来的 10 倍 (6 V)。同样, 对于交流耦合驱动器电路来说, 其在输出端串联了一个电容, 会对驱动器输出级的负载造成较大影响, 特别是 CMOS 工艺这种自身寄生效应就很严重的驱动器电路, 会导致带宽极大的衰减, 无法实现高速率模式下的工作。综上所述, 为了设计出可以工作在 25 Gbit/s 下的高速驱动器电路, 需要对传统的设计进行改进。

高速激光器驱动电路设计主要

有 3 个难点: (1) 当调制电流较高时, CMOS 的寄生效应就变得很严重, 从而限制了带宽导致严重的码间干扰, 因此必须采用为封装的裸片激光二极管芯片, 以避免封装导致的带宽衰减; (2) 由于无封装的 DFB 激光二极管的阻抗只有 10Ω 左右, 因此其低阻抗与驱动器之间的阻抗失配会导致二者之间产生严重的信号反射; (3) 激光二极管没有封装, 其和驱动器之间通过打金线连接, 这会导致严重的地弹噪声。

为了克服上述难点, 我们采用了图 4 中所示的驱动器, 驱动器采用了差分驱动的方式与激光二极管相连接来限制地弹噪声。为了减小高频时信号的损失, 驱动器电路中加入了一个连续时间均衡器 (CTLE), 它可以在 18 GHz 时提供 6 dB 的高频自举; 其后是一个带有可调负反馈电容的二阶的电流模式逻辑 (CML) 放大器, 用来调节前级均衡的强度; 在此放大器和驱动器输出级间是一个预驱动电路, 电路采用了电感并联峰化技术, 从而在高频时实现 6 dB 的峰化, 起到扩展带宽的作用。驱动器的输出级主要包括两个部分: 主驱动电路和容性耦合路径, 前者采用直流耦合连接方式差分驱动一个 25 Gbit/s 的激光二极管; 后者使用了交流耦合连接方式来构成一个辅助路径用来降低反射对信号的破坏。

与之前所描述的激光器驱动电路相比, 此方案的一个不同之处在于: 所驱动的激光二极管是以未经过封装的裸片的形式直接与驱动器通过金线相连接, 这样就可以极大地降低了封装所引入的电感, 从而使驱动电路可以工作在 25 Gbit/s 中。但因为采用了没有封装的裸片激光二极管, 这样会导致驱动器电路和发光芯片间有加大的阻抗失配, 在高数据率下工作时, 二者之间会产生严重的反射, 破坏信号的完整性。因此, 还需要额外的技术来消除反射对信号完整性的影响, 因此在图 4 中所示的驱

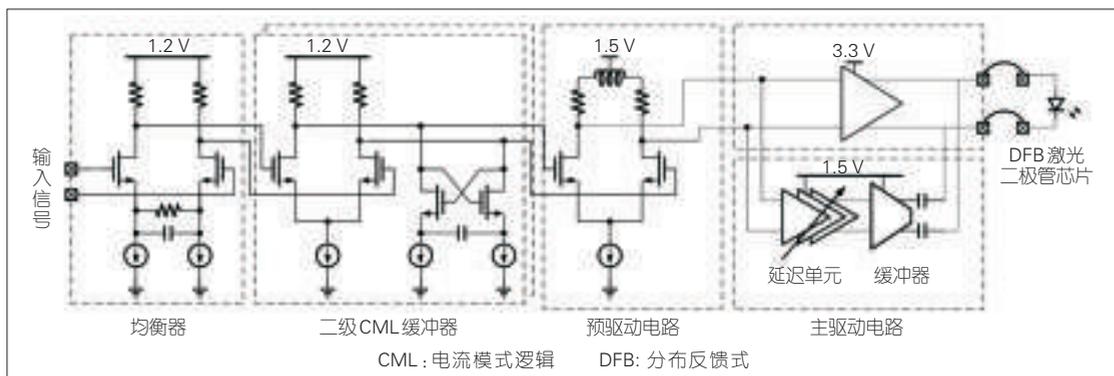


图4
25 Gbit/s 激光驱动器
结构示意图

动器电路中加入了电容耦合预加重 (CCPE) 辅助路径。

图4中所展示的设计结合了直流耦合与交流耦合两种驱动器设计,通过直流耦合将激光二极管与驱动器的主输出相连,避免了容性负载对带宽的衰减,此外引入了一个交流耦合的预加重辅助路径来降低反射对信号完整性的影响。图5a)为激光器驱动电路的主输出级与CCPE路径的电路原理图,其中主输出级主要由一对开关晶体管和一个电流源构成,分别起切换激光二极管工作模式和设置调制电流大小的作用,主输出级电路通过金线与激光二极管阴阳极差分相连,同时其阳极和阴极通过外置的磁珠(FB)被偏置到电源和一个可调电流源上,这样激光二极管的偏置电

流就由电源电压和此电流源决定。图中绿色和红色的箭头代表了当左右两个晶体管M1和M2分别闭合时交流电流的流向,对应着激光器的两个工作模式。

容性耦合电路主要是由一个电源电压为1.5V的CML电路和一个延时可调电路组成。预驱动器的输出信号通过延迟后出入到CML电路,之后再被两个电容耦合到驱动器电路的输出端,形成一个只包含波峰和波谷的脉冲,其位置由延时的大小控制,形状和强度分别通过电容值和CML电路中的电流源的大小调节。

图5b)为仿真所得的驱动器输出波形。反射信号在输出波形上表现为凸起或凹陷,通过调节延时的大小,当最主要的反射信号与脉冲信号

正好极性相反切位置相同时,再仔细调节脉冲的幅度,即可将主要的反射信号抵消滤除,从而可以得到图中所示的更加光滑的曲线,改善了信号的抖动。

3 测试结果

上文所描述的激光驱动器电路是基于台积电(TSMC)65 nm工艺设计的,并成功进行了流片,芯片面积约为1.2 mm²(包含防静电接口和焊盘)。图6为测试环境的示意图,高速的码型发生器产生10~25 Gbit/s的伪随机二进制序列(PRBS)的数字码型,输入信号经过宽带Bias-T偏置后差分输入到驱动器电路,驱动器电路和所使用的高速DFB激光二极管都被安置在一个电路板上,两者通过金

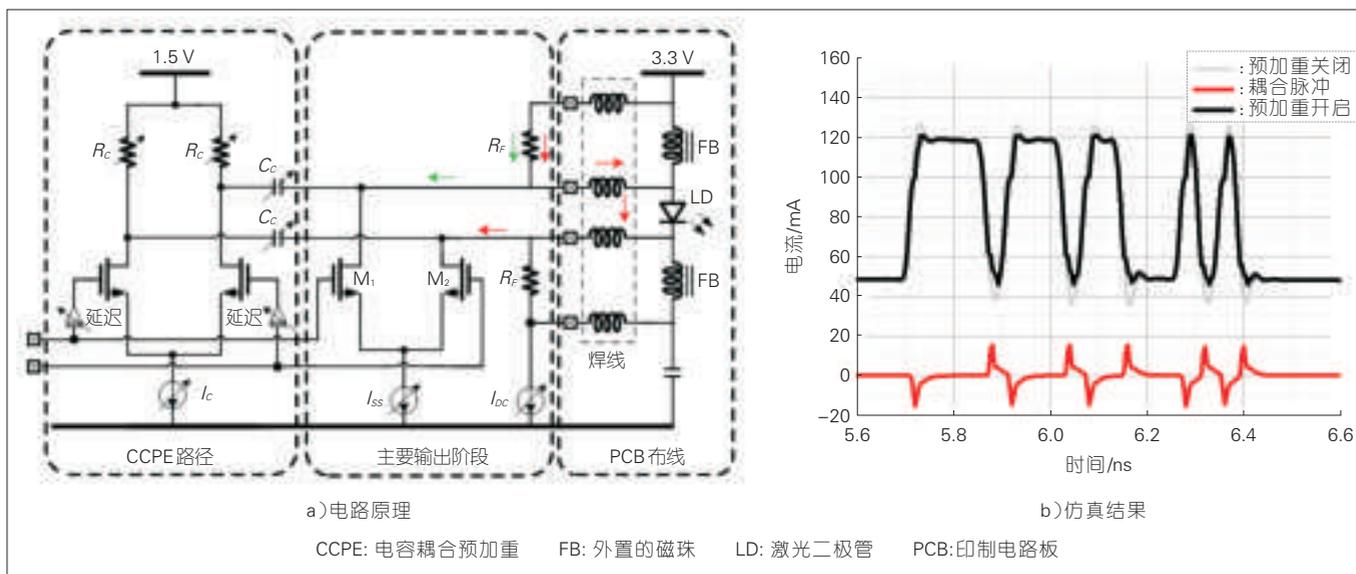
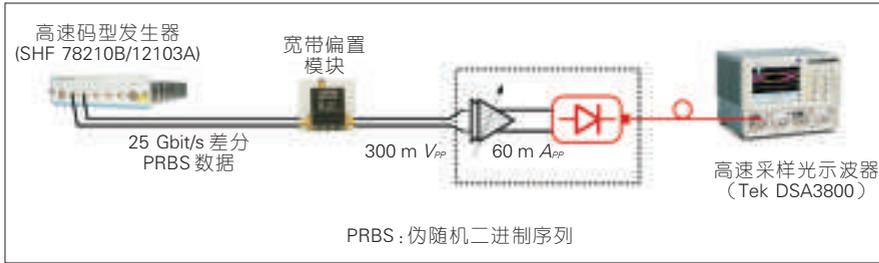


图5 驱动器输出级与预加重电路



▲ 图6 高速驱动器电路测试示意

线直接相连。因为 DFB 激光二极管是侧面发光且光斑尺寸非常小,因此在测试时用一根截面直径为 $10\ \mu\text{m}$ 且带有透镜的锥形光纤去对准发光区收集光信号。这时光纤被固定在一个 XYZ 平移轴上,通过调节平移轴的位置,使光纤与激光二极管的发光区对准,光纤另一端与带有光模块的高速数字采样示波器相连接,这样光信号就通过光纤传给了示波器。我们可以通过高速采样示波器来观测光眼图信息。

图7为此次激光器驱动电路在不同的输入下的测试结果:a)和b)分别为 10 Gbit/s 和 20 Gbit/s 时所得到的光眼图,此时未开通预加重辅助技术,观察到的抖动分别为 1.8 ps 和 3.2 ps,对应的消光比(ER)为 5.3 dB 和 5.6 dB;当改变输入到 25 Gbit/s 时,相同设置下光眼图的抖动增加到了

4.0 ps,消光比基本保持不变,如图c)所示;保持其他设置不变,打开预加重辅助技术,通过仔细调整延时和脉冲强度的大小,可以得到图7d)中的光眼图,此时的抖动被优化到了只有 2.9 ps,消光比为 4.6 dB,此时驱动器电路的功耗大约为 480 mW。

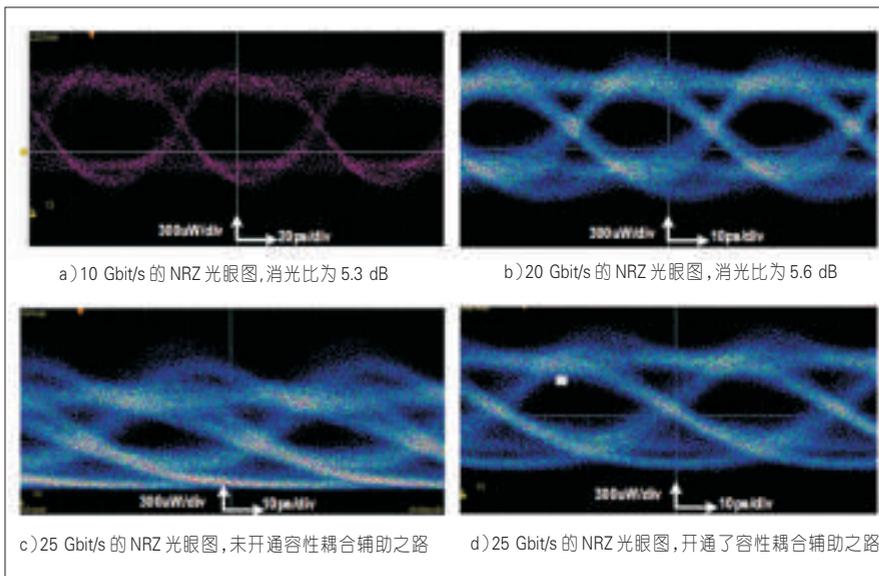
4 结束语

此次基于 TSMC 65 nm 工艺设计的激光器驱动电路的成功流片和测试可以说明:通过改进设计也是可以利用标准 CMOS 工艺实现 DFB 高速激光二极管高速工作的同时获得较大的调制电流,同时与其他高速激光器驱动电路相比,由于采用了 CMOS 工艺,也可以节省 20% 以上的功耗^[5-6]。通过比较可知:即便在较大的调制电流的情况下,预加重辅助技术也可以

极大地改善驱动电路的抖动,降低反射对信号的破坏,并且提高信号的完整性。

参考文献

- [1] SHEN P K, CHEN C T, CHANG C H, et al. Implementation of Chip-Level Optical Interconnect With Laser and Photodetector Using SOI-Based 3-D Guided-Wave Path [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(6): 2500310. DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2366165
- [2] Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for 40 Gb/s and 100 Gb/s operation: IEEE 802.3ba [S]. USA: IEEE, 2010
- [3] KASH J A, BENNER A F, DOANY E F, et al. Optical Interconnects in Future Servers[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference. USA: IEEE, 2011
- [4] Next Generation 100 Gb/s Optical Ethernet Study Group[EB/OL]. [2012-08-21] (2017-08-02). <http://www.ieee802.org/3/100NGOFTX/index.html>
- [5] TAKEMOTO T, MATSUOKA, SUGIYAMA Y Y, et al. A 50-Gb/s NRZ-Modulated Optical Transmitter Based on a DFB-LD and 0.18 um SiGe BiCMOS LD Driver [C]// Processing of OFC. USA: OFC, 2015
- [6] TAKEMOTO T, YAMASHITA, YUKI F, et al. A 25-Gb/s 2.2-W 65-nm CMOS Optical Transceiver Using a Power-Supply-Variation-Tolerant Analog Front End and Data-Format Conversion[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2014, 49(2): 471-485



▲ 图7 驱动器电路测量结果

作者简介



石泾波, 复旦大学在读博士生; 主要研究方向为数模混合集成电路设计, 特别是硅基高效高速率光电收发器芯片的研究。



祁楠, 中国科学院半导体研究所研究员, 中科院“百人计划”特聘研究员; 主要研究方向为数模混合集成电路设计, 特别是无线收发、高速光纤通信中的专用集成芯片等; 已发表论文 30 余篇, 获得授权专利 3 项。



Patrick Yin CHIANG, 复旦大学微电子学院教授, 中组部青年“千人计划”、上海市“千人计划”专家; 主要研究方向为高效收发器芯片、高速光互连收发机芯片; 已发表论文 120 余篇。

硅基片上光电传感及相关器件

Silicon-Based Optical Devices for On-Chip Sensing

周治平/ZHOU Zhiping
邓清中/DENG Qingzhong

(北京大学, 北京 100871)
(Peking University, Beijing 100871,
China)

硅基光电子学主要研究和开发以光子和电子为信息载体的硅基大规模集成技术^[1], 其具有片上光通信和片上光电传感两大主要应用。文章中, 我们聚焦于“传感”应用, 结合本课题组在硅基片上光电传感领域的研究成果对其基本原理以及相关器件进行介绍。

传统的光电传感器按结构主要可分为3类: 表面等离子体型^[2]、光纤型^[3]、集成光波导型^[4]。表面等离子体型传感器利用金属-介质界面作为传感结构, 在这一界面横磁波模式(TM)和金属表面电子的相互耦合形成一种特殊的电磁表面波模式——表面等离子体激元(SPP), 其特点是金属材料易于吸附生化分子, 吸附后会对SPP的传播特性产生显著影响从而实现了对吸附物的传感; 光纤型光电传感器以光纤(圆柱形介质波导)为传感介质, 其中待传感物质作为包层材料, 利用光纤传输模式中的倏逝场与包层材料的相互作用实现传感; 集成光波导型光电传感器的基本原理与光纤型相同, 区别在于波导结构

收稿日期: 2017-08-03
网络出版日期: 2017-09-06

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0043-004

摘要: 针对硅基光电子学在片上光电传感中的应用, 分析了硅基片上光电传感的工作原理, 指出该领域的主要研究方向包括: 提升传感灵敏度, 增加传感选择性, 减小温度相关性, 降低系统成本。结合本课题组的研究成果, 总结了其研究现状和各个研究方向在光电传感器结构设计方面获得的诸多进展。

关键词: 硅基光电子学; 片上光电传感; 光电子器件

Abstract: Focusing on the application of silicon photonic on-chip sensing, we point out that enhancing the sensitivity, improving the selectivity, reducing the temperature dependency, and lowering the cost are main research directions of silicon photonic on-chip sensing. The research status and progress in photoelectric sensor structure design are also summarized in this paper.

Key words: silicon photonics; on-chip sensing; photonic devices

为平面介质波导。文中我们所讨论的硅基片上光电传感器将生物、化学、物理等各种信息通过器件折射率的变化加载到光波中传播并最终转换为电信号进行处理, 是集成光波导型和表面等离子体型等光电传感器的主要发展方向。相比于传统的光电传感器, 硅基片上光电传感器具有更高的系统集成度, 可以方便地与片上的其他光、电功能器件进行传感系统的单片集成。

1 硅基片上光电传感原理

硅基片上光电传感的基本结构为光波导, 如条形波导、沟道波导等。不同的波导结构会有不同的传感性能, 但工作原理相同。文中, 我们以条形波导为例简述其工作原理。硅基条形波导的横截面结构如图1a)所示, 包括衬底、波导芯区、上包层。根据导行电磁波理论, 波导中的导模可以表示为:

$$\vec{E}(x, y, z) = \vec{E}_t(x, y) \cdot e^{-jn_{\text{eff}}k_0z} \quad (1)$$

式(1)中 \vec{E} 为光波的电场强度, 可以表达为横截面上的强度分布 \vec{E}_t 与传播方向的相位变化 $\exp(-jn_{\text{eff}}k_0z)$; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为光波在真空中传播时的波矢, 仅与光波长 λ 相关; n_{eff} 是导模的有效折射率。基模的 $|\vec{E}_t|$ 在波导中的分布如图1b)所示, 光场主要分布在波导芯区, 但也有部分光波分布在衬底和上包层中。因此有效折射率 n_{eff} 主要由波导芯区材料折射率 $n_{\text{芯}}$ 决定, 同时也与衬底和包层的材料折射率 ($n_{\text{衬}}$ 与 $n_{\text{包}}$) 相关。在线性近似下, n_{eff} 可表达为:

$$n_{\text{eff}} = \Gamma_{\text{芯}} \cdot n_{\text{芯}} + \Gamma_{\text{包}} \cdot n_{\text{包}} + \Gamma_{\text{衬}} \cdot n_{\text{衬}} + n_0 \quad (2)$$

式中 Γ 表示导模在波导各部分中的光功率分布比例。

由式(1)、(2)可见, 波导中任一材料折射率的改变都会影响

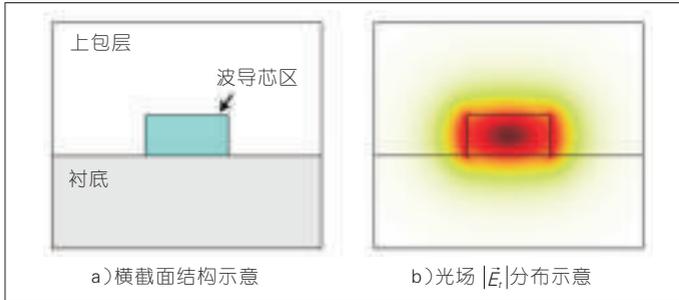


图1 硅基条形波导示意

其传播的光导模的相位。原理上,只要能引起波导中材料折射率变化的物理量都可以被传感。在实际应用中,衬底通常固定为二氧化硅(SiO₂),芯区材料为硅(Si)。通常利用待传感的物理量去影响上包层的材料折射率来实现传感;但待传感量反映在输出光波的相位中,而光波的相位无法进行直接监测。因此需要利用干涉或谐振结构来间接监测,其中最具代表性的是图2a)所示的微环谐振腔^[5-6]。当入射光波长 λ 满足式(3)时,微环内将会发生谐振。由此可见当待传感量引起 n_{eff} 变化时,谐振波长也会发生相应的漂移。

$$n_{eff} \cdot 2\pi R = m\lambda \quad (R \text{ 为微环半径}; m = 1, 2, \dots) \quad (3)$$

利用耦合模理论^[7]可以进一步得出微环的传输谱,如图2b)所示。传输谱的极小值处对应于式(3)中的谐振波长。谐振波长随待传感量发生漂移时,有两种方法进行监测:测量微环的传输谱,监测谐振波长的变化情况,称之为波长监测;固定工作波长在谐振波长附近,监测输出光强的变化情况,称之为强度监测。

前述理论分析将可引起材料折射率变化的物理量传感为光波强度或谐振波长这些可直接监测的物理量。接下来将结合研究实例介绍硅基片上光电传感的几个主要的研究方向包括提升传感灵敏度,增加传感选择性,减小温度相关性,降低系统成本等。

2 提升传感灵敏度

灵敏度指的是传感器能够检测

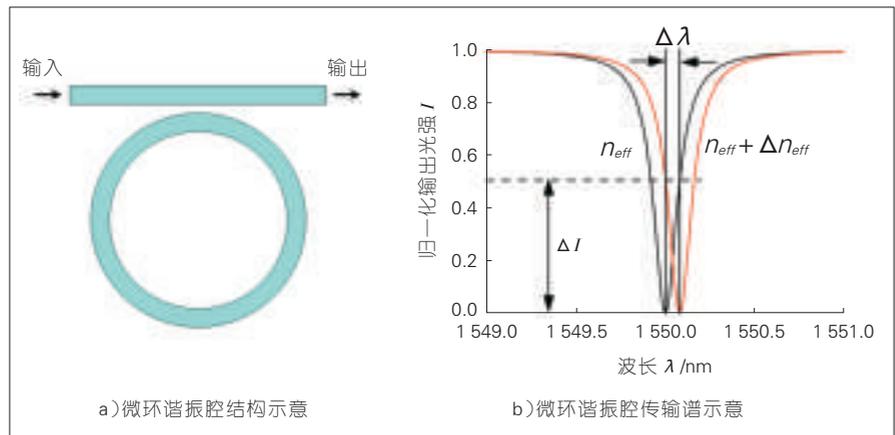
到的最小的待传感量的变化量,它是传感器的基础特性。提升灵敏度则依赖于对器件本身原理的研究。对于波长监测,相同待传感量的变化引起的有效折射率变化量越大则灵敏度越高。根据式(2)可知,让光波导模的光场更多地分布在上包层中,即可提升采用上包层进行传感时的灵敏度。如图3所示的沟道波导可以将光场主要限制在上包层的沟道区域内,其已被广泛用于提升传感灵敏度^[8]。此外,本课题组借鉴于游标卡尺原理提出了图4所示的多谱线漂移传感结构。这一结构通过检测传感环与参考环“重叠谐振峰”的漂移,

其传感灵敏度相对于单环结构提升了100倍,可达 2×10^{-6} 折射率单位(RIU)^[9]。

对于强度监测,除可类似于波长监测通过提升有效折射率随待传感量的变化率来提升灵敏度外,还可通过提升微环谐振波长附近传输谱线的斜率来提升灵敏度。采用如图5a)所示结构,由波导端面反射而产生的光场在直波导中形成法布里-珀罗(FP)谐振,其会和环形谐振腔中的谐振相互耦合,将原有环形谐振腔中的相位反馈到谐振当中,形成Fano谐振。具有Fano谐振特点的谱线具有非对称的谱线分布,一侧谱线的斜率将大幅增加,其传感灵敏度可达 10^{-8} RIU^[10]。采用如图5b)所示结构,将微环嵌入马赫曾德干涉仪(MZI)干涉结构中可以增加传输谱斜率^[11]。两种结构的传感灵敏度分别可以达到 $\sim 1.17 \times 10^{-7}$ RIU和 $\sim 4.9 \times 10^{-8}$ RIU。

3 增加传感选择性

前文提及的所有研究在传感时



▲图2 微环谐振腔示意

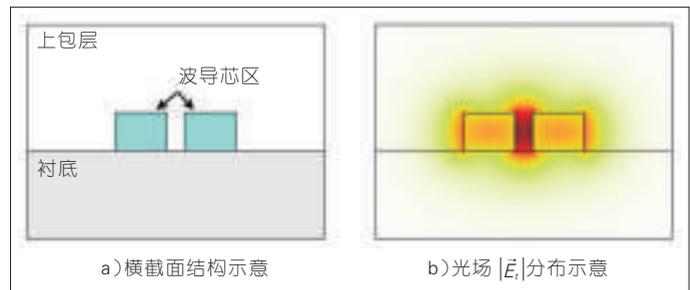
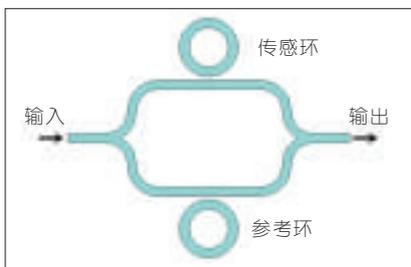


图3 硅基沟道波导示意



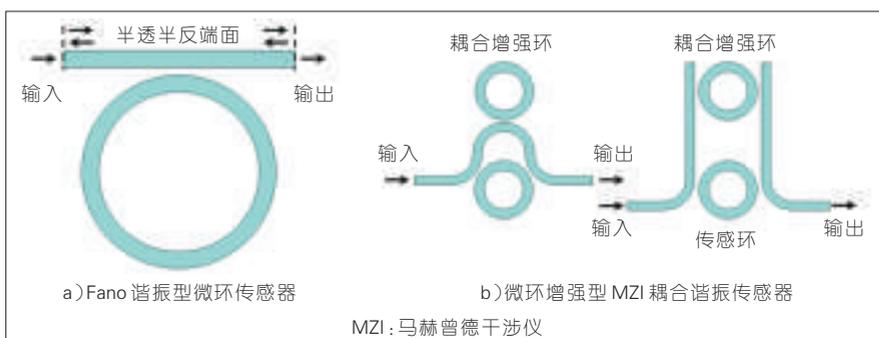
▲图4 多谐振漂移微环谐振腔传感器结构

使得传输谱整体横向漂移,而待传感量的变化会使得传输谱上下漂移。传输谱存在一定的“平底”区域,当温度变化引起的漂移量在这一范围时,将不影响传感。

5 降低系统成本

波长监测可以使用低成本的宽

用波长可精确控制的窄线宽激光器作光源,然后利用光电探测器将传感信号转换为电信号。波长可精确控制的窄线宽激光器或光谱分析设备都是十分昂贵的。虽然硅基光电温度传感器可通过互补金属氧化物半导体(CMOS)光刻工艺进行批量加工,具有低成本的特性,但整个系统成本仍旧很高。为了降低系统成本,浙江大学何建军教授课题组提出了串联双环传感^[15]结构,该结构将两个自由光谱范围具有微小差异的微环串联,并将其中一个微环用于传感。当待传感量引起传感环的谐振波长漂移时,整个结构的传输谱包络会在双环的游标效应下显著变化,从而整个系统可以采用低成本宽带光源和光电探测器进行架构,有效降低系统成本。本课题组也提出了一种低成本光电温度传感器^[16],如图7a)所示。匹配结构参数使得MZI两臂满足非对称平衡条件,则其传输谱将没



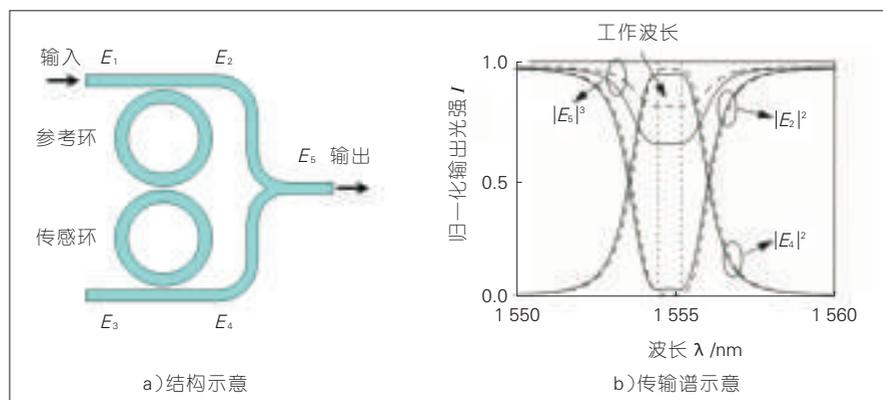
▲图5 高灵敏度型微环传感器

都不具有选择性,即所有能引起上包层材料折射率变化的物理量都会反映在最终的传感输出信号中且不能区分各个物理量对输出信号的贡献比例。这种传感器可用于已知物质的浓度传感,但不适用于复杂的生化传感。生化传感往往需要从混合物样本(如血清样本)中传感出某一特定组分(如某癌胚抗原)的含量,这就需要传感器具有选择性。硅基片上光电传感器选择性已经被广泛地研究,基本原理是对传感器中波导芯区的表面进行预处理,使其只能吸附特定的待传感物。例如将抗体作为生物探针预处理在波导芯区表层,则其只会选择性吸附相应的抗原^[12]。

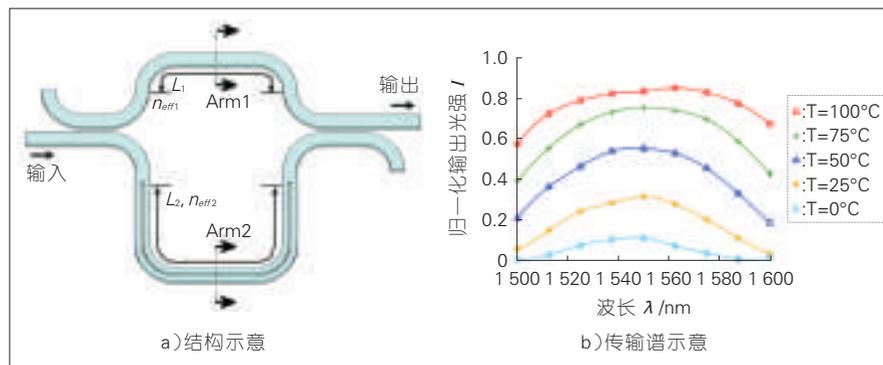
4 减小温度相关性

硅材料具有很强的热光效应,这将使得波导的有效折射率 n_{eff} 随温度而显著变化,会严重干扰传统传感器对目标物理量的传感。为了减小硅基片上光电传感器的温度相关性,本课题组提出了一种基于双环耦合的温度不敏感结构^[13-14],如图6a)所示,其传输谱如图6b)所示。温度变化会

带光源,但需要光谱分析设备进行传感输出信号的处理;强度监测需要使



▲图6 温度不敏感型光电传感器示意



▲图7 低成本温度传感器

有干涉峰,仅是温度的函数。如图7b)所示,传输谱随着温度的变化而整体上下漂移,因而也可以采用低成本的宽带光源和光电探测器来构建整个传感系统。

$$\text{非对称平衡条件: } \frac{n_{\text{eff}2}^0}{n_{\text{eff}1}^0} = \frac{\partial n_{\text{eff}2} / \partial \lambda}{\partial n_{\text{eff}1} / \partial \lambda} = \quad (4)$$

$\frac{L_1}{L_2}$ (上标0表示基准工作点时的值)

6 结束语

硅基片上光电传感器具有低成本、高系统集成度等诸多优点,在未来便携式传感等领域具有广泛的应用前景。文章中,我们对其基于倏逝波的传感原理进行了归纳总结,并结合本课题组的科研成果对当前主要的几个研究方向进行了介绍,包括提升传感灵敏度,增加传感选择性,减小温度相关性,降低系统成本。希望这些内容能有助于读者对硅基片上光电传感及相关器件的理解,积极推动这一研究领域的发展。

参考文献

- [1] 周治平. 硅基光电子学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012
 [2] ANKER J N, HALL W P, LYANDRES O, et al. Biosensing with Plasmonic Nanosensors [J]. Nature Materials, 2008, 7(6): 442–453

- [3] LEUNG A, SHANKAR P M, MUTHARASAN R. A Review of Fiber-Optic Biosensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007, 125(2): 688–703
 [4] FAN X, WHITE I M, SHOPAVA S I, et al. Sensitive Optical Biosensors for Unlabeled Targets: A Review[J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 620(1–2): 8–26. DOI: 10.1016/j.aca.2008.05.022
 [5] CHEN Y, LI Z, YI H, et al. Microring Resonator for Glucose Sensing Applications [J]. Frontiers of Optoelectronics in China, 2009, 2(3): 304–307
 [6] XIA Z, CHEN Y, ZHOU Z. Dual Waveguide Coupled Microring Resonator Sensor Based on Intensity Detection [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2008, 44(1): 100–107. DOI: 10.1109/JQE.2007.909519
 [7] YARIV A. Universal Relations for Coupling of Optical Power between Microresonators and Dielectric Waveguides [J]. Electronics Letters, 2000, 36(4): 321–322. DOI: 10.1049/el:20000340
 [8] DELL'OLIO F, PASSARO V M. Optical Sensing by Optimized Silicon Slot Waveguides[J]. Optics Express, 2007, 15(8): 4977–4993. DOI: 10.1364/OE.15.004977
 [9] YI H, CITRIN D S, CHEN Y, et al. Dual-Microring-Resonator Interference Sensor[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(19): 191112. DOI: 10.1063/1.3263726
 [10] YI H, CITRIN D S, ZHOU Z. Highly Sensitive Silicon Microring Sensor with Sharp Asymmetrical Resonance[J]. Optics Express, 2010, 18(3): 2967–2972. DOI: 10.1364/OE.18.002967
 [11] YI H, CITRIN D S, ZHOU Z. Coupling-Induced High-Sensitivity Silicon Microring Intensity-Based Sensor[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011, 28(7): 1611
 [12] WASHBURN A L, GUNN L C, BAILEY R C. Label-Free Quantitation of a Cancer Biomarker in Complex Media Using Silicon Photonic Microring Resonators [J]. Analytical Chemistry, 2009, 81(22): 9499–9506
 [13] YI H, CITRIN D S, ZHOU Z. Highly Sensitive Athermal Optical Microring Sensor Based

on Intensity Detection[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 44(3): 354–358. DOI: 10.1364/OE.18.002967

- [14] DENG Q, LI X, ZHOU Z, et al. Athermal Scheme Based on Resonance Splitting for Silicon-on-Insulator Microring Resonators [J]. Photonics Research, 2014, 2(2): 71–74
 [15] JIN L, LI M, HE J. Optical Waveguide Double-Ring Sensor Using Intensity Interrogation with a Low-Cost Broadband Source[J]. Optics Letters, 2011, 36(7): 1128
 [16] DENG Q, LI X, CHEN R, et al. Low-Cost Silicon Photonic Temperature Sensor Using Broadband Light Source[C]// The 11th International Conference on Group IV Photonics. USA: IEEE, 2014: WP23

作者简介



周治平, 北京大学信息科学技术学院教授、博士生导师, 教育部长江学者, OSA Fellow, SPIE Fellow, IET Fellow, 中国光学学会理事, 中国光学工程学会常务理事, IEEE中国武汉分会创会主席(2006—2008年), 《Photonics Research》创刊主编, 《Electronics Letters》中国版主编(2008—2010); 承担过国家基金委重点项目、科技部“973”项目、“863”项目, 以及工业界支持的多个横向项目; 多次主持IEEE、SPIE、OSA, 以及中国光学学会等举办的国际学术会议; 主编出版中外物理学精品书系《硅基光电子学》; 已发表论文400余篇, 拥有专利20余项。



邓清中, 北京大学信息科学技术学院博士研究生; 主要研究方向为硅基光电子器件及系统; 已发表SCI/ EI收录论文29篇。

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^[6]、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者而言,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者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者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者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。这需要我们拥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。

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

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, 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。

5G 承载网的需求、架构和解决方案

Requirements, Architecture and Solutions for 5G Transport

李光/LI Guang

赵福川/ZHAO Fuchuan

王延松/WANG Yansong

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

1 5G 承载网络面临的挑战

5G 的“万物互联”相对于 4G 将带来革命性网络体验和新的商业应用模式,同时也对作为基础网络的承载网提出了巨大挑战。

5G 采用新的空口技术,支持包括超高可靠性超低时延业务 (URLLC)、增强移动宽带 (eMBB) 和海量物联网业务 (mMTC) 等新业务。按照预测,未来 5G 网络的移动数据流量相对于 4G 网络将增长 500~1 000 倍,典型用户数据速率可提升 10~100 倍,峰值传输速率可达 10 Gbit/s 或更高,端到端时延缩短了 5~10 倍,网络综合能效提升了 1 000 倍^[1]。

5G 核心网络的架构相对于 4G 也发生了较大的变化。核心网云化、转发和控制分离,采用基于软件定义网络/网络功能虚拟化 (SDN/NFV) 的虚拟化切片技术,可将核心网功能分布式部署为多个虚拟网元,切片化部署有利于 5G 的新业务开展,例如:URLLC 业务的核心网切片将下沉到靠近基站的位置,从而满足对网络低

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0056-005

摘要: 认为 5G 承载网面临超大带宽、低时延、灵活连接、网络切片和超高精度时间同步等诸多挑战。分析了中兴通讯在 5G 承载技术方面的研究和创新,包括:基于 FlexE 的大带宽、低时延和业务隔离技术、满足 5G 泛在灵活连接的 Segment Routing 路由优化技术、基于网络切片的软件定义网络 (SDN) 架构和控制技术、超高精度时间同步技术等。

关键词: 5G 承载; 灵活以太网 (FlexE); Segment Routing; SDN; 超高精度时间同步

Abstract: In this paper, challenges for 5G transport network are described, such as ultra-high bandwidth, low latency, ubiquitous connectivity, network slicing and high-precision time synchronization. ZTE's research and innovation on 5G transport technology are then analyzed, including ultra-high bandwidth, low latency and service isolation technology based on FlexE, Segment Routing optimization technology, software defined networking (SDN) architecture and control technology based on network slicing, and ultra-precision time synchronization technology.

Keywords: 5G transport; flexible ethernet (FlexE); Segment Routing; SDN; ultra-precision time synchronization

时延的需求。

5G 无线基站的密度更大,基站的协同和移动性切换问题驱动无线架构集中处理的无线接入网 (C-RAN) 化。在 5G 的 C-RAN 架构下^[2], RAN 功能被重构为集中单元 (CU)、分布单元 (DU) 和有源天线单元 (AAU) 这 3 个功能实体。CU 和 DU 之间按照 RAN 的高层功能划分, CU 和 DU 的接口带宽与回传接近。DU 和 AAU 之间按照 RAN 的底层功能划分,目前接口还没有标准化,趋向于采用增强通用公共无线电接口 (eCPRI) 接口。eCPRI 接口采用分组化以太网接口,带宽与天线数解耦,相对于传统 CPRI 传输带宽降低 10 倍以上,有助于降低成本。5G 的承载网络架构如图 1 所示。

在这个架构下, CU 和 DU 之间的

承载网络为 Midhaul (中传), DU 和 AAU 之间的承载网络为 Fronthaul (前传), 5G 承载网所面临着的主要挑战如下。

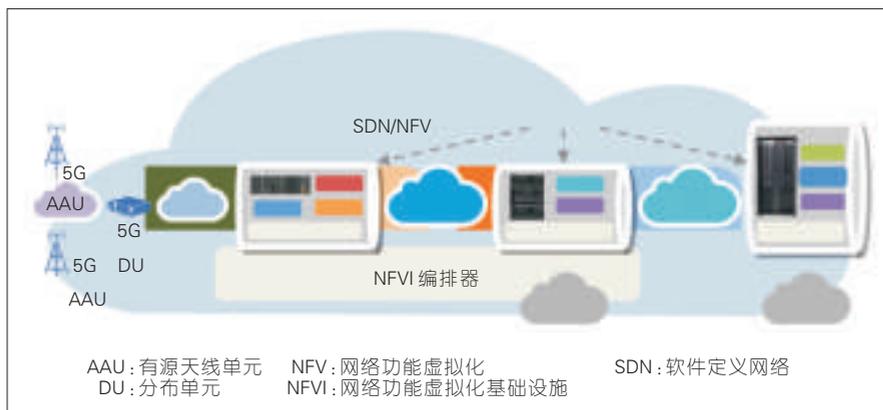
(1) 前传和中传网: 5G 的前传、中传对承载网的时延要求非常高。按照目前的技术预估,前传传输时延的预算不超过 30 us,中传的时延需求不超过 150 us。

(2) 回传网: 带宽增加 10 倍以上,流量模型从汇聚为主变为全 mesh。4G 和 5G 网络融合的双连接、基站的站间协同、核心网云化部署的负载均衡和多归属备份,以及更加复杂和动态的流量,推动 5G 承载网络重构,支持灵活的业务连接。

(3) 超高精度时间同步: 引入 5G 的超短帧、载波聚合和多点协作传输 (COMP) 多点协同技术,驱动时间同

收稿日期: 2017-07-28

网络出版日期: 2017-09-13



▲ 图1 5G承载网络架构

步精度提升一个数量级,能够从4G的 $\pm 1.5 \mu s$ 提升到 $\pm 130 ns$ 。

(4)网络切片:核心网和RAN采用基于SDN/NFV的云化切片架构,不同的切片对带宽、时延、网络功能和可靠性的要求也不相同,这就要求5G承载网也具备提供网络切片的能力,使不同切片的承载网络资源能够灵活动态地分配和释放。为了满足不同的业务应用场景,5G的核心网和无线接入网均采用了网络切片的架构。

2 5G 承载关键技术和解决方案研究

2.1 FlexE 技术及其创新

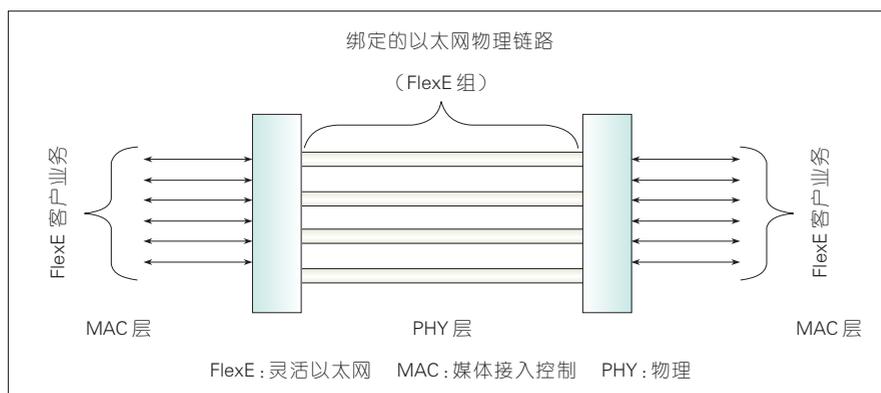
灵活以太网(FlexE)技术^[1]由光互连论坛(OIF)标准所定义,FlexE增强了以太网的物理编码子层(PCS)能力,实现了媒体接入控制(MAC)层和物理(PHY)层接口收发器的解耦,从而大大增强了以太网的组网灵活性,如图2所示。

FlexE可以通过多个物理链路捆绑扩展网络的容量,满足5G所需要的大带宽需求,解决了传统以太网链路聚合组(LAG)在多链路传输时因为Hash导致的链路容量不均匀分配问题,同时FlexE可以通过Shim层的时隙配置支持多个客户业务,实现多个客户业务之间的物理隔离功能。但是FlexE只是一个接口技术,针对

5G网络的前传和回传的网络虚拟切片和低时延传送等一系列的需求,还需要进一步地进行功能扩展和技术创新。

FlexE隧道技术是其中的一个重要功能扩展,FlexE隧道技术包括FlexE交换,操作、管理、维护(OAM)以及保护倒换技术。FlexE交换是基于时间片的66 bit数据块交换技术,工作在L1层。交换不需要队列调度,不需要查找报文的MAC和IP地址,交换时延和时延抖动极低,不同的业务通过时间片进行隔离,相互之间完全不会产生影响。采用FlexE交换技术可以在多个网元之间建立FlexE隧道。FlexE隧道是端到端的刚性电路信道,在FlexE隧道的中间转发点,不需要弹出分组,从而实现了超低时延和严格的物理隔离特性,如图3所示。

FlexE OAM用于检测隧道的性能



▲ 图2 FlexE的通用结构

和故障,在发生故障时,可以对FlexE隧道配置1+1线性保护,实现故障时的故障快速倒换。

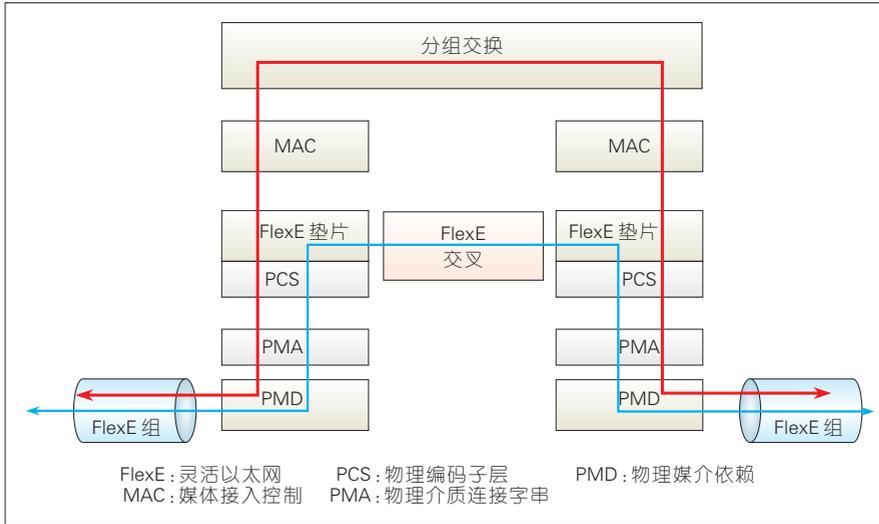
FlexE Tunnel技术将FlexE从接口级的技术扩展到网络级的技术,从而很好地满足了5G网络前传和回传的网络虚拟切片和低时延传送需求。

2.2 源路由技术

5G的云化网络架构如图4所示。

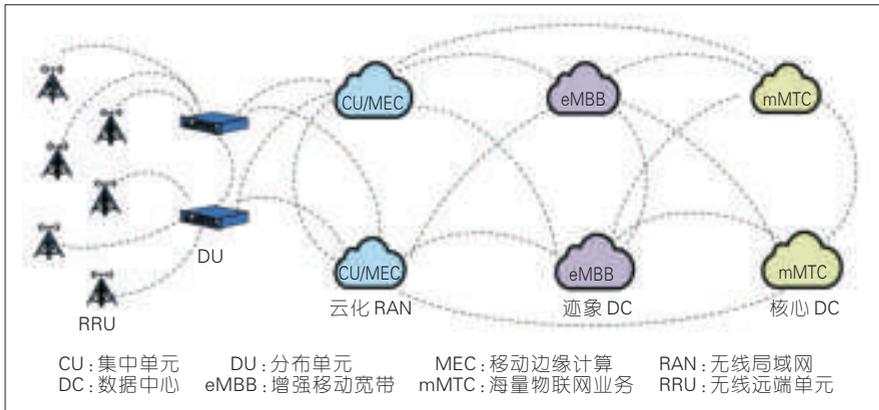
5G采用基于SDN/NFV的信息通信(ICT)网络架构,核心网和基站的云化分布式部署带来了泛在连接的传送需求,包括:下一代核心网(NGC)/Cloud RAN pooling、异地Multi-home、数据中心(DC)互联容灾等,也要求承载网应具备按需建立海量灵活连接的能力。传统的承载网采用互联网多协议标签(IP/MPLS)或者传送特性的多协议标签交换(MPLS-TP),动态或者静态地创建业务承载的隧道连接,设备需要维护的路径信息随着连接数线性增加,信令压力增大,严重影响网络的扩展性和运维成本。

Segment Routing(分段路由)^[4]是一种源路由技术,采用该技术,转发点不需要感知业务状态,只维护拓扑信息,实现业务实例数与网络的解耦,大大提升了网络支持泛在连接的能力和扩展性。Segment Routing的原理是在源节点通过把携带路由信息的指令压栈到报文头中,中间转发点逐跳提前并弹出相关的指令进行报



▲图3 FlexE的时隙交叉技术

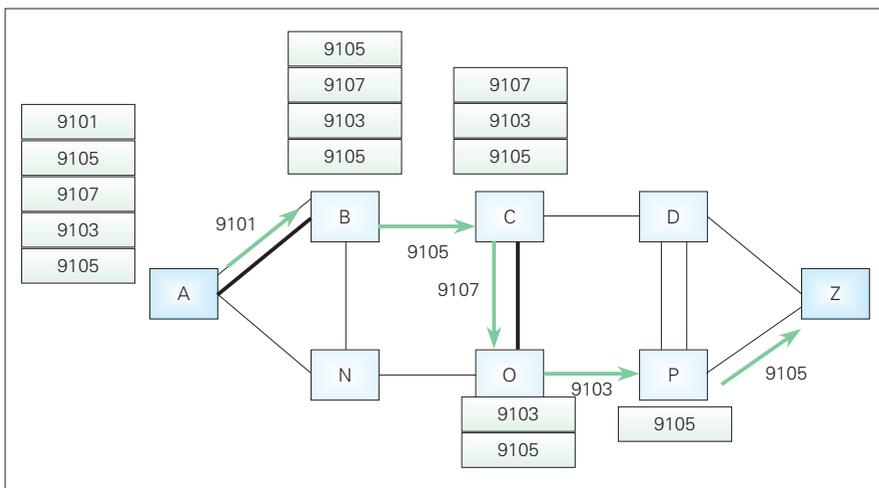
业务需求的最佳转发路径,把路由信息下发给源节点即可,不需要对转发路径上的其他节点进行控制或者信令交互,从而极大地提升了网络的控制性能。Segment Routing 支持严格约束路由和松散约束路由,在松散约束路由的场景下,转发面需要支持内部网关协议(IGP)协议,松散约束路由可以支持拓扑无关-快速路由恢复(TI-LFA FRR)抗多点失效的局部保护。在传送网中引入 Segment Routing 技术还存在着部分问题有待研究,例如: Segment Routing 是与业务无关的转发机制,针对业务的层次化的服务质量(H-QoS)应该如何部署等一些的问题。



▲图4 5G云化网络架构

2.3 5G 承载的 SDN 架构

5G 网络引入了切片的概念,网络切片是一组专业的逻辑网络的集合,该集合作为服务,支持网络的差异化,满足垂直行业的多元化需求。5G 的网络切片实例是一个端到端的逻辑网络,由一组网络功能、资源和连接关系组成。包括了无线、传送网和核心网^[9]。5G 网络切片的 SDN 控制架构如图6所示。



▲图5 Segment Routing 隧道

文转发,如图5所示。

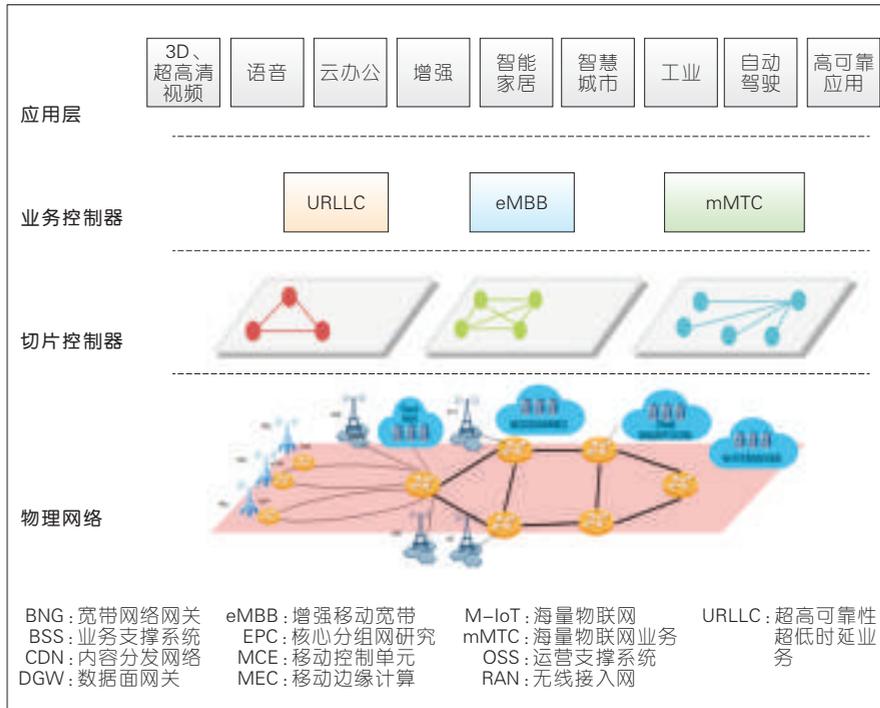
Segment Routing 技术非常便于与

SDN 技术融合,SDN 通过网络的流量和拓扑资源的情况,集中计算出符合

在这个架构下,承载网的网络切片包括了转发面(物理网络)、切片控制器和业务控制器3个部分,三者互为服务和客户层的递归关系。

转发面需要支持不同业务切片的隔离和部分资源共享,转发面的虚拟化概念由来已久,虽然可以用第3层虚拟专用网络(L3VPN)、MPLS 嵌套等方式实现底层虚拟化映射,但這些技术在隔离和效率方面和实际的物理隔离还是有一定差距的。FlexE 和 FlexE Tunnel 技术能够提供底层接口级和网络级硬管道支撑,无论是在效率还是在隔离方面都进一步缩小了虚拟网络与物理网络的差异,是后续网络虚拟化要支持的主要转发面技术。

切片控制器是实现网络切片/虚拟化的一种特殊控制器,负责创建虚



▲图6 5G网络切片的SDN控制架构

拟网络(Vnet)以及Vnet生命周期的管理。Vnet与物理资源存在映射关系,Vnet网络由虚拟节点(Vnode)和虚拟链路(Vlink)构成,作为Vnet Client的上层控制器只能使用切片控制器分配给自己的Vnet资源。

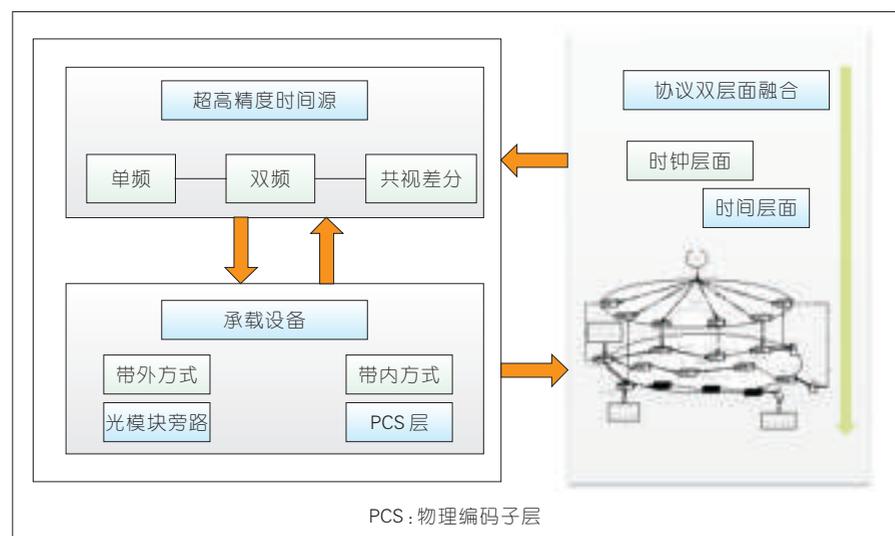
业务控制器在网络切片控制器创建的Vnet拓扑上编排业务,不同的业务控制器彼此独立,可以运行不同的控制协议,例如:一个业务控制器可运行Segment Routing的控制协议编排端到端业务,另一个业务控制器可以允许MPLS-TP的控制协议编排端到端业务。

作为5G切片网络的一部分,承载网的控制器需要与无线、核心网的分层SDN/NFV进行协同,需要引入一个跨专业的协同器才能完成端到端切片的业务链编排,这方面的协同器开发需要依靠接口的标准化工作的推动,目前这方面的工作还处于起步阶段。

2.4 超高精度数据同步技术

5G的载波聚合、多点协同和超短

帧要求空口之间的时间同步精度偏差小于260 ns;5G的基本业务采用时分双工(TDD)制式,要求任意两个空口之间的相对精度偏差小于1.5 us;5G的室内定位增值服务对时间同步的精度要求更高,要求一定区域内基站空口时间同步的相对精度小于10 ns^[6]。超高精度时间同步的技术架构如图7所示。



▲图7 高精度时钟源和承载设备

超高精度时间源的关键技术包括本地源技术和异地多源比对技术。本地源技术包括单频、多频全球定位系统(GPS)/北斗卫星同步技术;异地多源比对技术是采用异地共视差分技术消除空间电离层等干扰因素,进一步提升时间同步精度,使得同步信号可以溯源到更高精度的参考源。

5G承载设备的超高精度时间传递技术涉及到设备和链路上的时间同步技术升级,设备内的包括超高精度的时戳、鉴相器、锁相环技术,链路上的则涉及到非对称性补偿技术和消除非对称性的单纤双向时钟传送技术。

超高精度时间同步的监测技术对于运维也是非常重要的,常用的同步监测技术包括利用精密时间同步协议(PTP)技术进行同步性能监测,部署探针进行网络同步性能监测等方法。

3 结束语

从目前的5G标准和研究情况看,5G承载不仅需要带宽例行升级,还需要引入新的网络技术和架构,这已得到业界的广泛关注和认可。中兴通讯在5G承载的关键技术上做了大量创新性研究,推动5G承

载的关键技术产业化和标准化,具体如下:

(1) 基于 FlexE 的技术不仅可以满足大带宽的组网能力,而且为 5G 网络的切片和低时延转发提供关键技术支撑;

(2) Segment Routing 路由优化技术是目前为止面向 5G 泛在连接的最佳解决方案,有利于传送网向 SDN 方式迁移;

(3) 5G 承载的 SDN 架构是面向网络切片的,采用这个架构有助于与无线、核心网切片形成端到端解决方案,更好地满足垂直行业差异化应用的需求;

(4) 5G 的室内定位和站间协作需要超高精度时间同步,超高精度时间源和承载设备的技术是关键。

2017 年,在 5G 外场测试的驱动下,5G 承载技术的研究和设备开发进入了关键期,为配合 5G 无线和核

心网的需求,将对 5G 承载的关键技术进行测试和评估。5G 建设,承载先行,5G 承载网的技术、标准和产业化将变得越来越重要。

参考文献

- [1] 中兴通讯. 5G 技术白皮书[R/OL]. (2016-04-22)[2017-07-03]. <http://www.zte.com.cn/china/solutions/access/5g/424379>
- [2] 黄金日,段然. “迈向 5G C-RAN:需求、架构与挑战”技术白皮书 V1.0[R]. 北京: 中国移动研究院, 2016
- [3] Optical Internetworking Forum. Flex Ethernet Implementation Agreement OIF-FLEXE-01.0 [R]. California: OIF, 2016
- [4] Internet Engineering Task Force. Segment Routing Architecture, Draft-IETF-Spring-Segment-Routing-10[R]. California: IETF, 2016
- [5] China Mobile, Deutsche Telekom AG, Volkswagen Group, et al. 5G Service-Guaranteed network slicing, White paper V1.0[R]. Barcelona: China Mobile, 2017
- [6] LI H, HAN L, DUAN R, et al. Analysis of the Synchronization Requirements of 5G and Corresponding Solutions[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2017, 1(1):52-58. DOI: 10.1109/MCOMSTD.2017.1600768ST

作者简介



李光, 中兴通讯股份有限公司有线研究院院长;先后主持程控交换机、IP 语音网、3G 平台、高端路由器、光传输、交换机等产品开发;曾承担科技部重大专项、江苏省、深圳市等国家课题 5 项,获省部级奖励 3 项;已申请专利 10 余项。



赵福川, 中兴通讯股份有限公司承载网产品线规划总工;主要研究方向为 5G 承载、PTN 和 IP-RAN 产品规划;曾承担国家重大专项 1 项,获得国家科技进步二等奖 2 项、省部级奖励 2 项;已申请专利 10 余项。



王延松, 中兴通讯股份有限公司承载网预研技术总工、科技部十三五“宽带网与新型网络”主题专家;主要研究方向为软件定义网络、网络功能虚拟化等;曾主持或参与省部级项目 8 项,获得省部级科技进步奖 1 项;已发表学术论文 5 篇,申请专利 10 余项。

智能工厂的感知、通信与控制

Co-Design of Sensing, Communication and Control for the Smart Factory

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0061-006

摘要: 认为信息化和工业化的深度融合是未来工业化的必然趋势, 基于感知、通信、控制相融合的工业网络系统有利于推动全局统筹调度、过程运行优化和系统反馈控制等的实现, 为建立高品质、低能耗、个性化、小批量生产的智能工厂奠定基础。同时, 还提出了一种基于工业网络系统的智能工厂架构, 指出了传统工厂面临的挑战, 以及实现智能工厂亟需解决的关键问题。

关键词: 智能工厂; 工业网络系统; 感知通信控制一体化设计

Abstract: Deeply integration of informatization and industrialization is an inevitable trend of future industrialization. The industrial network based on combining sensing, communications and control is beneficial for global scheduling, process optimization and feedback control. In this way, the high-product-quality, low-energy-consumption and small-batch-production smart factories foundation can be built. Moreover, an architecture of smart factory is proposed, the challenges of traditional factories and the key issues in realizing the smart factory are analyzed.

Keywords: smart factory; industrial network systems; co-design of sensing, communication and control

关新平 / GUAN Xinping
吕玲 / LYU Ling
杨博 / YANG Bo

(上海交通大学, 上海 200240)
(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai
200240, China)

广泛利用工业自动化、智能设备、大数据等, 形成具有自感知、自调节、自执行等“知识自动化”功能的新一代智能系统: 通过工业网络系统实现生产的跨层协同与跨域集成, 通过面向服务制造的工业软件实现柔性生产, 通过工业大数据分析实现产业链的上下互动, 通过工业系统安全标准保证可管、可控与可信。

制造业是国民经济的主体, 是立国之本、兴国之器、强国之基。改革开放以来, 中国制造业持续快速发展, 建成了门类齐全、独立完整的产业体系, 有力推动工业化和现代化进程, 显著增强综合国力, 支撑世界大国地位。然而, 与世界先进水平相比, 中国制造业仍然大而不强, 在自主创新能力、资源利用效率、产业结构水平、信息化程度、质量效益等方面差距明显, 转型升级和跨越发展的任务紧迫而艰巨。在新环境下, 中国政府立足于国际产业变革大势, 全面提升中国制造业发展质量和水平。国务院发布《中国制造 2025》, 明确提出通过政府引导、资源整合, 实施国

家制造业创新中心建设、智能制造、工业强基、绿色制造、高端装备创新 5 项重大工程, 实现长期制约制造业发展的关键共性技术突破, 提升中国工业企业的整体竞争力。

近年来, 日趋激烈的市场竞争迫使工业企业由过去的单纯追求大型化、高速化、连续化, 转向注重提高产品质量, 降低生产成本, 减少资源消耗和环境污染, 可持续发展的道路上来。面对制造模式的逐步转型升级, 智能工厂本质上是利用计算机技术、通信技术、网络技术、自动控制技术、人机交互和虚拟现实等先进技术, 融合智能装备/设备, 形成高度协同的生产系统(含实时监测控制系统、自动化流程管理、环境监测与管理等系统), 达到生产的最优化、流程的最简化和效率的最大化。其主要特征为

1 智能工厂发展面临的机遇和挑战

以信息技术和自动化技术为核心的智能工厂发展战略是提高中国工业竞争力的必然选择。信息技术作为智能工厂的关键, 已经成为信息化推动工业化发展的代表性技术, 是国际技术竞争的焦点和科技的制高点。随着信息通信技术的不断发展, 成本低、易部署、可移动的无线设备已被广泛应用于工业现场监测控制, 如基于传感器、控制器、执行器等构成的智能生产系统。在智能化工厂车间中, 感知设备可布置在一些不易人为监测和管理的环境中, 实现监测控制与预警操作, 并能在紧急情况下实现无人监测控制的应急处理, 避免工业设备的大规模级联失效等故

收稿日期: 2016-07-25
网络出版日期: 2017-07-05

障。此外,智能设备的感知信息通过有线/无线异构通信网络传输到远端控制中心,控制中心将网络空间的高级计算能力有效运用于现实世界中,从而可对与生产、设计、开发有关的所有数据进行统一分析,实现生产资源、人力资源和经济资源的合理分配,并对工厂中各物理实体进行实时高效地调整和控制,提高工程监管的效率。

然而,目前企业的工厂仍处在批量化、低收益、高能耗的传统工业模式,因此要在现有基础上实现智能工厂面临着巨大挑战,其中较为显著且至关重要的三大挑战如下。

挑战1:数据采集器功能单一、数目稀少、采集参数少,难以满足个性化、小批量生产对多维丰富数据的要求。随着人们消费理念与偏好的升级,追求消费的个性化已经成为现实与趋势,消费者不再满足现有制造业所能够提供的标准化产品,这些传统标准化产品的用户满意度越来越低,个性化、小批量定制生产已成为未来制造业发展趋势。由于全流程中影响产品质量的参数众多且动态变化,需要部署更多数目、更多种类以获取更多参数信息数据的采集,实现对物理世界的泛在感知。因此,智能工厂必须具备多类大量的智能感知设备,以快速获取生产全流程的全面数据,并基于数据分析实现生产目标的自我调整,自动驱动生产加工,保持产品品质,最后生产出个性化产品。

挑战2:现有有线网络覆盖范围有限、可扩展性较差、可承载业务量与种类有限,难以为智能工厂中大量不同应用提供满意的服务质量。随着无线通信技术的快速发展,无线通信和网络技术被引入了工业控制领域;但在许多工业领域,由于安全性、效率、费用等,无线网络不太可能取代目前已经得到广泛应用的各种有线网络。因此,有线/无线异构工业网络已成为工业监测控制领域的一个新兴热点,推动了传统工厂向智能

工厂发展,降低了智能工厂全面监测的建设和维护成本。在有线、无线异构,多种网络并存的工业网络系统中,通过利用软件定义网络技术对并存的多个网络进行统一管理,同时设计建立工业网络多协议转换体系,实现有线/无线异构网络与系统的融合,既保留了有线通信的高安全性与可靠性,也充分利用工业无线技术为多类工业应用提供满意的服务,以实现按需高效地获取众多在线监测的重要工业过程参数,并以此为基础实施优化控制定制生产,达到提高产品质量,提高能源效率,完成个性化柔性生产的目标。

挑战3:企业管理与生产排程、工序分配相分离,难以满足智能工厂对柔性生产智能按需控制的需求。智能工厂自动化系统已由集散控制系统演进到计算、通信与控制融合的时代,探索智能工厂从控制域到管理域的垂直集成实现技术新模式,研发智能工厂制造执行系统与运营管理平台,实现工厂的智能生产与智能管理。由于智能工厂的子系统众多,智能工厂中感知信息与控制决策传输的具体实现过程与传统工厂存在很大的差异,传统工厂的控制管理系统已不能够提供满意的控制性。通过设计可重构软件架构来提高系统的可扩展性,以促进制造过程系统设计、控制与优化工业软件。通过开发可编程智能控制器实现可编程分布式自主逻辑控制,以实现智能控制器与系统的开发。与此同时,工业网络系统的性能好坏既取决于控制器执行控制算法,也与系统参数、控制命令等数据的感知精度与传输质量有关,因此控制算法设计与感知策略、通信协议是相互依赖、相互影响的,单纯优化任意一个并不能满足工业网络系统的整体性能要求。因此,感知通信控制一体化设计对于提高智能工厂性能至关重要。

虽然实现智能工厂面临着巨大挑战,但是智能工厂的发展却是势在必行、亟需推进的。

与此同时,各国针对如何实现智能工厂也采取众多举措。德国的工业4.0充分利用信息通信技术和网络空间虚拟系统、信息物理系统相结合的手段,推动制造业向智能化转型,将实体物理世界与虚拟网络世界融合、产品全生命周期、全制造流程数字化以及基于信息通信技术的模块集成,形成一种高度灵活、个性化、数字化的产品与服务新生产模式。美国的互联网以及信息通信技术巨头与传统制造业领导厂商携手推出工业互联网概念,GE、思科、IBM、AT&T、英特尔等80多家企业成立了工业互联网联盟。通过制定通用标准,利用网络和数据的力量,打破技术壁垒,提升整个工业的价值创造能力,更好地促进物理世界和数字世界的融合。2016年3月,德国工业4.0平台和美国工业互联网联盟双方达成共识,形成了初始映射图,以显示两种架构之间的直接关系;制定了未来确保互操作性的一个清晰路线图,以及工业互联网中标准化、架构和业务成果方面的合作。

中国将智能制造定位于国家战略高度。2015年国务院出台了《中国制造2025》,明确提出通过政府引导、整合资源,实施国家制造业创新中心建设、智能制造、工业强基、绿色制造、高端装备创新5项重大工程,实现长期制约制造业发展的关键共性技术突破,提升中国工业企业的整体竞争力。中国共产党第十六次代表大会(以下简称16大)报告明确指出:“实现工业化仍然是中国现代化进程中艰巨的历史性任务。信息化是中国加快实现工业化和现代化的必然选择。坚持以信息化带动工业化,以工业化促进信息化,走出一条科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的新型工业化路子”。中国共产党第十七次代表大会(以下简称17大)报告也明确指出:“加强能源资源节约和生态环境,增强可持续发

展能力”，“发展现代化产业体系，大力推进信息化与工业化融合，促进工业由大变强，振兴装备制造业，淘汰落后生产能力”。

2 面向智能工厂的感知传输控制一体化设计

目前工厂的管理与运行大多以工程师为主体，当市场需求和生产工况发生频繁变化时，以人工操作为主体的生产计划、调度和工艺技术等部门不能及时、准确地调整相应的指标，导致产品质量下降，生产效率降低和能耗增加，从而无法实现企业综合生产指标的优化控制。因此，面向未来智能工厂，研究基于感知传输控制一体化的工业网络系统，以实现智能工厂从控制域到管理域的垂直集成，实现工厂的智能生产与智能管理，对提高工业产值、个性化生产至关重要。智能工厂的工业网络系统架构主要分为3层：现场设备层，网关层，传感器云层^[1]。

现场设备层主要是实现对工况的泛在感知。其主要目的是通过利用异构大量的智能感知设备以快速全面地获取生产加工过程中的数据，并对获取到的数据进行分析，实现对产品全生命周期信息的全面掌控。

网关层面主要是建立现场设备与网关之间的双向连接并完成数据通信。其主要目的是通过软件定义网络技术对有线无线并存的多个网络进行统一管理，为多类工业应用提供满意的服务，实现按需高效获取众多在线监测的重要工业过程参数。

传感器云层面主要是将各类应用需求与网关层面的服务质量需求相匹配，并生成控制指令。其主要目的是根据用户个性化需求，智能地做出生产决策，并将其转化为底层系统相应的控制指令，促进实现个性化、小批量、低能耗、高收益的生产目标。

2.1 感知

数据是所有智能的源头，因此数

据获取是实现工业网络系统的第1步。在工业网络系统中，传感设备收集物理单元运行状态信息，并且将其通过实时通信网络传送到计算单元，实现智能控制。在此过程中，数据获取性能受到传感设备硬件、通信资源、时变传输环境影响，最终导致某个或某些获取不到数据或者获取到的数据收到严重污染。因此，需要对获取到的数据进行分析，可使用基于信息稀疏性的重构技术与基于部分可观测信息的状态估计技术，尽可能地提取原始数据携带的信息，完成最终的物理单元感知过程。

针对状态问题，我们前期工作着眼于如何提高工业网络系统状态感知的准确性与一致性^[2-6]。在复杂恶劣的工业环境中，机器马达和设备运转时产生的噪声会干扰传感器节点的正确感知，使得其感知性能和感知数据存在较大误差，且分布在不同位置的节点获取的数据往往存在较大差异，单一节点感知数据不准确、节点间信息不一致等现象明显。针对工业过程监测控制的需求，将大量、多类传感器根据不同工艺过程进行密集部署，以获取更丰富、更准确的生产运行状态信息。同时，将底层现场子网、中间层 Mesh 骨干网和顶层工业以太网的无线/有线异构网络相互融合，形成新一代的混合网络架构，实现对现有工业有线网络的补充与改进。此分布式/集中式混合架构可以保证感知信息的准确性、一致性、完备性，因此基于有线/无线异构网络的混合式信息感知是实现泛在感知的关键。

考虑感知设备涉及两类传感器节点，其中第1类节点为主节点，其全体记为 I_S ；第2类节点为中继节点，其全体记为 I_R 。每个主节点获得测量值 $y_{i,w}(k)$ ，每个中继节点只负责为主节点转发数据，并无感知能力。一般将网络抽象为图，从图论的角度来刻画网络拓扑，然后根据节点间的距离来确定邻居集合，邻居节点

间相互交换信息，实现分布式协同估计，最终达到一致。将节点的通信网络建模为一个无向图 $G=(V,E)$ ，其中 $V=I_S \cup I_R$ 为所有节点的全体， $E \subset V \times V$ 为节点间所有通信链接的集合。在节点 i 的通信半径 κ 范围之内的所有节点为节点 i 的邻居，记为 N_i ， $N_i = \{j \in V: d_{ij} \leq \kappa\}, \forall i \in V$ 。在滤波器的演化过程中，主节点首先感知环境，获得状态的观测值以及邻居节点的估计值，并根据这些信息去更新自己的估计值，如公式(1)所示。

$$x_{i,w}(k) = \phi_{i,w} [y_{i,w}(k) - x_{i,w}(k)] + \varphi_{i,w} x_{i,w}(k) + \sum_{j \in N_i} \sigma_{ij}^w [X_{j,w} \{s_{ij}(k)\} - x_{i,w}(k)], i \in I_S \quad (1)$$

然后，主节点将更新后的估计值发送给其邻居节点。中继节点在接收到信息后，根据公式(2)将信息加权处理后广播出去。

$$x_{i,w}(k) = \sum_{j \in N_i} \vartheta_{ij}^w x_{j,w}(k) + \vartheta_{ij}^w x_{i,w}(k), i \in I_R \quad (2)$$

其中， $\phi_{i,w}$ 和 $\varphi_{i,w}$ 为常数， σ_{ij}^w 与传感器发射功率与邻居间具有有关， $\vartheta_{ij}^w \geq 0, \sum_{j \in N_i} \vartheta_{ij}^w = 1, \forall i \in I_R$ 。在上述过程中，节点间的通信仅限于邻居节点之间，故公式(1)和公式(2)是分布式的，且能够很好地消除单一节点感知不准确对物理单元状态感知性能的影响。

2.2 通信

针对工业网络系统大规模、异构、高实时、高可靠及可重构需求，研究工业网络系统一体化网络架构，以解决工业网络泛在互联、可靠传输和即插即用的问题。为了攻克工业以太网与低速现场总线、工业无线网络的互联共存技术，研究制造装备垂直集成和水平集成的互操作标准技术体系与架构。并在此架构下，研究基于软件定义的可重构工业控制网络，以攻克基于软件定义的流程交换技术，管理和控制业务混合传输模式下的

实时调度技术、网络自动重构技术。基于上述研究的架构,设计多网间跨域跨层合作通信协议,保证数据传输的实时性、可靠性、可扩展性。

针对可靠传输问题,我们前期部分工作着眼于如何提高工业无线网络信息传输可靠性^[7-9]。工业无线传输过程涉及电磁频谱异常拥挤,频谱资源受限,通信设备能量受限,多信道接入、传输冲突、传输时延大等问题,为了实现在恶劣工业环境下可靠的通信,有必要构建一个保障服务质量的、实时的、可靠的和自适应的通信协议,特别是无线通信协议,以保障信息物理系统中数据的高可靠性传输^[9]。现有的 WirelessHART、ISA100.11a 和 WIA-PA 工业无线标准协议都基于时分多址(TDMA)技术,进行确定性的、可控的数据传输调度以保证数据的时效性与可靠性。越来越多的无线设备和网络,已经对有限的频谱资源形成巨大压力,然而当非授权无线频谱资源越来越拥挤和不足时,部分已被分配的固定用户使用频段却没有得到充分的利用,降低频谱资源利用率。为减少频谱资源浪费,认知无线电技术被提出并逐渐兴起,它使无线设备具有认知功能,能主动感知周围环境的可用频谱,并在其空闲时加以利用,实现频谱动态分配,极大地提高频谱利用率,解决

频谱资源紧张的问题,受到学术界和工业界的极大关注,被认为是通信领域未来发展的关键技术之一^[10-11]。因此可以借助认知无线电技术扩展网络的可用频谱,通过设计高效可靠的信息传输协议实现感知信息的可靠传输,这对工业网络系统的控制性能至关重要。

另外,在智能工厂中部署多类传感器节点,感知不同参数,各类节点根据信息重要性的不同,具有不同的传输优先等级。过程数据的传输时效一般为毫秒级到秒级,需要很高的传输实时性和可靠性;而设备环境监测数据的时效性相对要长很多,一般在秒级以上。因此,自动化过程数据就要求比设备环境监测数据具有更高的优先等级,如何设计满足智能工厂多优先级异构数据收集和传输对于整个工控系统安全高效的运行至关重要。针对此问题,我们前期工作将异构多优先级数据抽象建模成不同的传输优先等级,然后设计一个优先级协调器,指定当高优先级的节点在指定的时隙没有数据传输的时候,低优先级节点才能进行数据传输。如图1所示,以一个3类优先级节点和2个信道的场景为例,说明此多信道多优先级传输机制。此机制首先为3类优先级节点分别设计了多信道超帧,由3个不同颜色深度的超帧表示。

通过这种 TDMA 多信道传输规划,在相同的优先等级的节点之间不会发生冲突,冲突只可能发生在不同传输优先级的节点之间。由于3个超帧是分离设计的,都完全利用了超帧中的所有信道和时隙资源,因而每个时隙都同时分配给了不同优先等级的节点。为了解决这种可能的冲突,进而设计了优先级传输控制机制,通过引入一个优先级指示标识来协调各节点按照预设的优先级进行数据传输。通过这种方式,低优先级的节点只能机会式地传输。因此,需要引入一个优先级指示标识,以便对节点的优先级进行声明和辨识,进而利用此指示标识完成多优先级数据传输控制,协调不同优先级的节点在来各个时隙和信道上进行数据传输。

2.3 控制

智能工厂自动化系统已由集散控制系统演进到计算、通信与控制融合的时代,其智能化体现在:具有高效、灵活、可扩展与可重构功能的控制管理系统;具有自主、安全、稳定与分布式控制功能的现场控制器;具有实时、可靠、鲁棒与自适应性能的控制算法等各个层面。

工业控制管理系统需要具有高效、灵活、可扩展与可重构功能。面向未来智能工厂,探索智能工厂从控

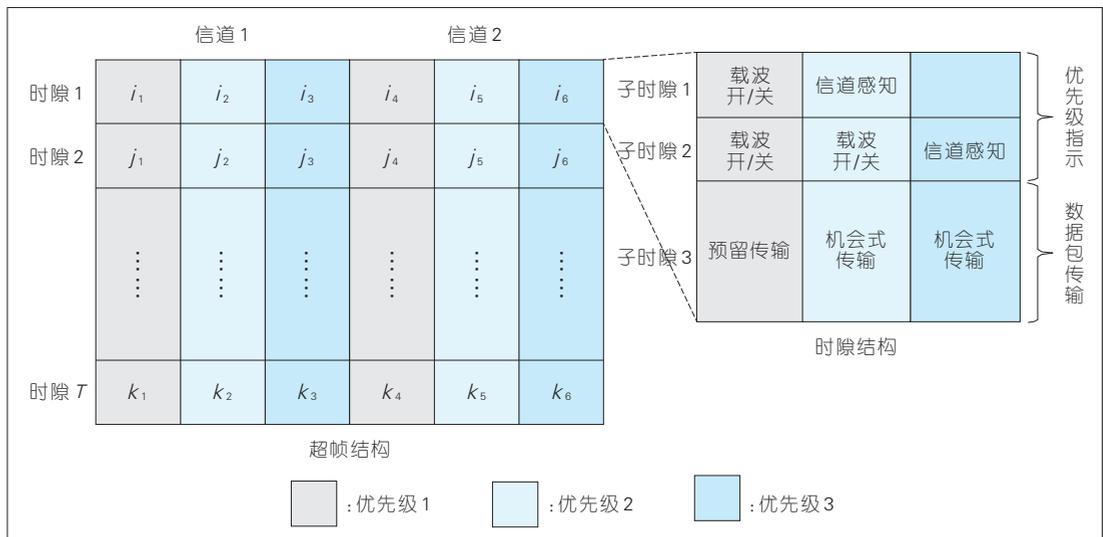


图1 多信道多优先级调度机制

制域到管理域的垂直集成,实现技术新模式,研发制造过程系统设计、控制与优化工业软件,研发智能工厂制造执行系统与运营管理平台,实现工厂的智能生产与智能管理。由于智能工厂的子系统众多,智能工厂中感知信息与控制决策传输的具体实现过程与传统工厂存在很大的差异,传统工厂的控制管理系统已不能够提供满意控制性,需要设计可重构软件架构来提高系统的可扩展性,建立工业网络多协议转换体系以实现有线/无线异构网络与系统的融合。分布式结构为自动化系统提供了高度的灵活性与高效协作的可能性,基于IEC61499标准的分布式工业自动化软件设计范式采用面向服务的软件架构,建立基于时间与事件混合驱动的计算模式,实现高效、灵活、可扩充与可重构的工业分布式软件架构。完整分布式自动化系统的软件模型中应包含控制软件、工业系统物理信息模型以及通信模型。因此建模语言可以表示为 $M(t)=(S,P,C)$, 其中 S 代表控制软件模型, P 代表系统物理仿真模型, C 代表通信协议模型。考虑到分布式自动化系统的复杂性、多样性等特点,以及用户体验,可在IEC61499标准的基础上,根据分布式自动化系统特点,实现对控制、仿真与通信进行抽象化建模,使得各类不同设备可以根据自身的性能从协议中选择支持的指令,实现可扩充、可重构的分布式自动控制软件系统。

现场控制器需要具有实时、自主、分布式以及模块化控制能力。面向智能工厂大规模分布式控制需求进行理念创新,研发智能控制器与系统,实现分布式逻辑控制和运动控制的功能整合,开发先进可编程智能控制器,实现可编程分布式自主逻辑控制,以及分布式实时可靠控制。从嵌入式硬件层面,进行面向分布式集群控制的工业控制器模块化架构设计,采用PC104总线架构,基于复杂可编程逻辑器件(CPLD)的软件可编程逻辑

辑控制器(PLC)输入/输出模块、模块化控制扩展模块以及Can、Ethernet、EtherCat等通信模块,实现面向运动控制、过程控制、时序控制的混合控制架构;从嵌入式软件层面,通过研究软件PLC模块的关键技术,提升大规模多任务分布式控制模式下实时操作系统的响应能力;从上位机软件层面,基于组态编码的数字量和条件解析技术,实现分布式信息交互的逻辑控制。

控制算法需要具有实时、可靠、鲁棒的控制性能。智能工厂中控制器执行的控制算法性能由工业网络系统的通信性能和控制策略共同决定,且二者相互依赖、相互影响的关系,单纯优化任意一个并不能满足工业网络系统的整体性设计要求,因此控制与通信一体化设计对于工业网络系统性能优化至关重要。在有线/无线多网共存且异构的通信环境中,有线网络带宽相对较低,无线网络存在信道时变、衰落严重、噪音干扰等多种不利因素,导致工业网络系统的网络环境具有极大的动态性、不确定性。加之可用通信网络资源有限,携带控制命令的数据包在通信网络中可能遭受较大的传输时延,即使此控制命令在决策时十分准确,但是因为其时延过大,到达物理单元时已经过时,因此物理单元将认为此控制命令是无效的。另外,如果动态的网络环境导致此控制命令丢失,那么物理单元将无控制命令可执行,因此需要考虑丢包、时延等网络诱导因素对控制性能影响。在这样的网络环境下,实时、可靠、鲁棒控制的技术难点在于有限的网络资源导致部分感知信息丢失,无线资源调度直接控制器的稳定性,使得基于传统控制系统以及状态估计理论的设计与分析方法难以直接应用到基于无线技术的工业网络系统控制器的设计。因此,在网络资源受限的情况下,实时、可靠、鲁棒的控制面临新的挑战,直接决定智能工厂中的工业系统是否能够安全、稳

定、高效地运行。然而,目前基于控制与通信联合设计的网络系统性能优化在国际上仍处于探索阶段,尚不具备一套完整的理论与设计方法,有必要深入地研究。关于感知、传输、控制一体化设计研究刚刚起步^[12-16],可将分布式状态估计、基于估计的控制以及无线网络资源进行优化联合设计,构建能够表征工业信息系统的总代价函数,包括估计代价、控制代价以及通信代价。与此同时,还需要满足无冲突可靠传输、最大发射功率限制、可用无线资源约束等要求。

3 结束语

在未来的智能工厂中,智能现场设备的感知信息通过多网并存的有线/无线异构通信网络传输到远端控制中心,控制中心运用高级计算能力对与生产、设计、开发有关的所有数据进行统一分析与决策。基于工业网络系统的智能工厂架构主要分为三大层面:现场设备层面主要是实现对工况的泛在感知;网关层面主要是建立现场设备与网关之间的双向连接并完成数据通信;传感器云层面主要是将各类应用需求与网关层面的服务质量需求相匹配,并生成控制指令。面向未来智能工厂,研究基于感知通信控制一体化的工业网络系统有利于推动全局统筹调度、过程运行优化和系统反馈控制等;有利于促进实现智能工厂从控制域到管理域的垂直集成;有利于提高产品质量,降低生产能耗,实现个性化小批量生产;有利于推进智能工厂的建成。

参考文献

- [1] HU P. A System Architecture for Software-Defined Industrial Internet of Things[C]//IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband. IEEE, 2016:1-5. DOI: 10.1109/ICUWB.2015.7324414
- [2] CHEN C, ZHU S, GUAN X, et al. Wireless Sensor Networks: Distributed Consensus Estimation[M]. New York:Springer, 2014.
- [3] CHEN C, YAN J, LU N, et al. Ubiquitous Monitoring for Industrial Cyber-Physical Systems Over Relay-Assisted Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2015, 3(3): 352-362. DOI: 10.1109/TETC.2014.2386615

- [4] ZHU S, XIE L, CHEN C, et al. Collective Behavior of Mobile Agents with State-Dependent Interactions [J]. Automatica, 2015, 51:394-401. DOI: 10.1016/j.automatica.2014.10.064
- [5] ZHU S, CHEN C, MA X, et al. Consensus Based Estimation Over Relay Assisted Sensor Networks for Situation Monitoring[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2015, 9(2):278-291. DOI: 10.1109/JSTSP.2014.2375851
- [6] ZHU S, CHEN C, LI W, et al. Distributed Optimal Consensus Filter For Target Tracking in Heterogeneous Sensor Networks[J]. IEEE Trans Cybern, 2013, 43(6):1963-1976. DOI: 10.1109/TSMCB.2012.2236647
- [7] LIN F, CHEN C, ZHANG N, et al. Autonomous Channel Switching: Towards Efficient Spectrum Sharing for Industrial Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(2):231-243. DOI: 10.1109/JIOT.2015.2490544
- [8] LIN F, CHEN C, XU Q, et al. A Separate Design Principle for Priority-Aware Packet Collection in Industrial Cyber-Physical Systems[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking, 2016, 2016(1):1-14. DOI: 10.1186/s13638-016-0572-x
- [9] LIU Y, ZHU Y, NI L, et al. A Reliability-Oriented Transmission Service in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2011, 22(12): 2100-2107. DOI: 10.1109/TPDS.2011.113
- [10] LYU L, CHEN C, YAN J, et al. State Estimation Oriented Wireless Transmission for Ubiquitous Monitoring in Industrial Cyber-Physical Systems[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2016, (99):1-1. DOI: 10.1109/TETC.2016.2573719
- [11] AZARFAR A, FRIGON J F, SANJO B. Improving the Reliability of Wireless Networks Using Cognitive Radios[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 14(2):338-354. DOI: 10.1109/SURV.2011.021111.00064
- [12] GATSIS K, RIBEIRO A, PAPPAS G J. Optimal Power Management in Wireless Control Systems[C]//American Control Conference. USA:IEEE, 2013:1562-1569. DOI: 10.1109/ACC.2013.6580058
- [13] GASIS K, PAJIC M, RIBEIRO A, et al. Opportunistic Control Over Shared Wireless Channels[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(12):3140-3155. DOI: 10.1109/TAC.2015.2416922
- [14] LI H, WU C, SHI P, et al. Control of Nonlinear Networked Systems With Packet Dropouts: Interval Type-2 Fuzzy Model-Based Approach.[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 45(11):2378. DOI: 10.1109/TCYB.2014.2371814
- [15] ZHANG L, GAO H, KAYNAK O. Network-Induced Constraints in Networked Control Systems—A Survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 9(1):403-416. DOI: 10.1109/TII.2012.2219540
- [16] YANG R, LIU G P, SHI P, et al. Predictive Output Feedback Control for Networked Control Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1):512-520. DOI: 10.1109/TIE.2013.2248339

作者简介



关新平, 上海交通大学讲席教授、博士生导师;研究方向为工业网络系统设计、控制与优化等;国家杰出青年基金获得者, 教育部长江学者特聘教授, 已主持“973”课题、国家自然科学基金重点项目、上海市科委重大项目等30余项, 曾获“国家自然科学基金一等奖”2项, 2008年获“IEEE模糊系统汇刊杰出论文奖”;已出版专著4部, 发表SCI论文130余篇。



吕玲, 上海交通大学自动化系在读博士研究生;研究方向为工业网络系统中控制和通信联合设计、网络环境下的控制与估计、可靠的无线通信协议设计、多域通信资源的优化分配等;已发表论文6篇。



杨博, 上海交通大学自动化系教授、博士生导师;研究方向为无线网络资源分配、网络安全、智能电网等;已发表论文100余篇。

“中兴通讯技术杂志社第23次编委会议暨2017通信热点技术研讨会”在银川隆重召开

2017年8月12—13日,来自国内外高校、运营商、研究院所及企业界的近百位ICT专家学者齐聚银川,参加“中兴通讯技术杂志社第23次编委会议暨2017通信热点技术研讨会”。中兴通讯董事长殷一民、高级副总裁陈杰等公司领导 and 专家出席会议。

编委会上,殷一民董事长分析了行业发展态势,介绍了中兴通讯最新的发展情况。他认为,在ICT行业状态不太稳定、运营商持续投入能力下降的形势下,中兴通讯正在市场和技术两个领域持续加大投入,技术能力尤其是无线能力正跻身于全球最好的企业之一;从市场上看,目前的整体环境给了中兴通讯很多机会,这些将促使企业持续增长。他还指出:美国事件并未对公司的市场和技术能力造成实质性的损害,反而提升了员工的士气,促进了公司管理水平的提升;公司将把人才、合规、内部控制为战略基础,通过实现“5G先锋”的目标,使公司走到行业前列。

杂志社常务副总编黄新明做了杂志社年度工作报告,代表们充分肯定了编辑部的努力以及刊物发展取得的成绩,讨论确定了《中兴通讯技术》、《ZTE COMMUNICATIONS》



2018年专题名称及策划人。

在通信热点技术研讨会上,赵慧玲、郑纬民、李少谦、曹建农等18位海内外专家针对网络云化、存储系统、太赫兹通信、SDN、区块链、数据和能量一体化通信网等前沿技术做了精彩的学术报告。

每年一度的杂志社编委会不仅为刊物发展谋篇布局,而且为ICT高端专家提供了智慧交融、思想碰撞的平台,更是刊物影响力的延伸。



中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

办刊宗旨

以人为本,荟萃通信技术领域精英;
迎接挑战,把握世界通信技术动态;
立即行动,求解通信发展疑难课题;
励精图治,促进民族信息产业崛起。

双月刊 1995年创刊 总第136期
2017年10月 第23卷5期

主管:安徽省科学技术厅
主办:安徽省科学技术情报研究所
中兴通讯股份有限公司
编辑:《中兴通讯技术》编辑部

总编:陈杰
常务副总编:黄新明
责任编辑:徐烨
编辑:卢丹,朱莉,赵陆
排版制作:余刚
发行:王萍萍
编务:王坤

《中兴通讯技术》编辑部
地址:合肥市金寨路329号凯旋大厦12楼
邮编:230061
网址:tech.zte.com.cn
投稿平台:tech.zte.com.cn/submission
电子信箱:magazine@zte.com.cn
电话:(0551)65533356
传真:(0551)65850139

出版、发行:中兴通讯技术杂志社
发行范围:全球发行
印刷:合肥添彩包装有限公司
出版日期:2017年10月10日
中国标准连续出版物号: $\frac{\text{ISSN } 1009-6868}{\text{CN } 34-1228/\text{TN}}$
定价:每册20.00元,全年120.00元