



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
CODEN ZTJHAY

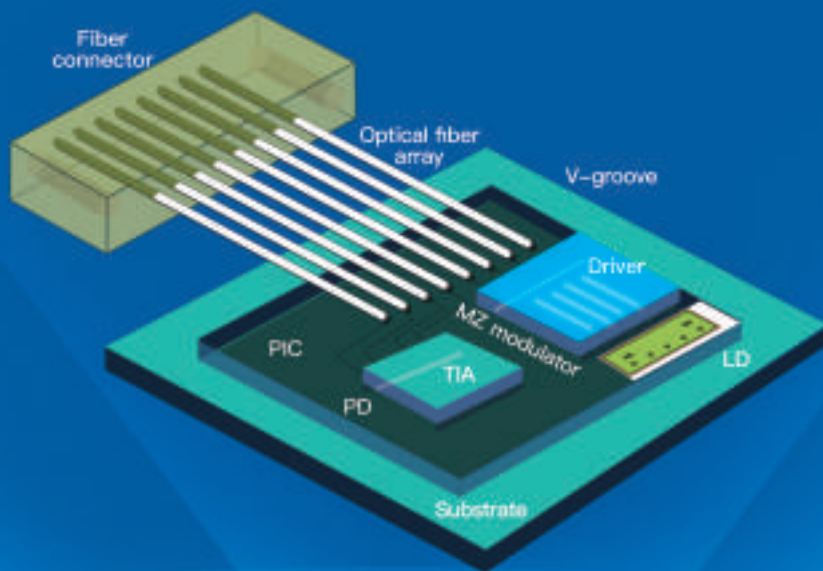
中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

<http://tech.zte.com.cn>

2018年8月 • 第4期

专题：5G 回传网络光电子器件技术



《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）

副主任 徐子阳（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 北京航空航天大学党委书记 | 唐雄燕 中国联通网络技术研究院首席专家 |
| 陈建平 上海交通大学教授 | 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 西安电子科技大学教授 | 王文东 北京邮电大学教授 |
| 管海兵 上海交通大学教授 | 王喜瑜 中兴通讯股份有限公司执行副总裁 |
| 洪波 中兴发展股份有限公司总裁 | 王翔 中兴通讯股份有限公司高级副总裁 |
| 洪伟 东南大学教授 | 卫国 中国科学技术大学教授 |
| 纪越峰 北京邮电大学教授 | 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 浙江大学教授 | 徐安士 北京大学教授 |
| 李红滨 北京大学教授 | 徐子阳 中兴通讯股份有限公司总裁 |
| 李建东 西安电子科技大学副校长 | 续合元 中国信息通信研究院副总工 |
| 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 | 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 电子科技大学教授 | 尤肖虎 东南大学教授 |
| 李星 清华大学教授 | 张宏科 北京交通大学教授 |
| 刘建伟 北京航空航天大学教授 | 张平 北京邮电大学教授 |
| 陆建华 中国科学院院士 | 张云勇 中国联通研究院院长 |
| 马建国 广东工业大学教授 | 赵慧玲 中国通信标准化协会网络与业务委员会主席 |
| 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 |
| 孙知信 南京邮电大学教授 | 周亮 南京邮电大学教授 |
| 谈振辉 北京交通大学教授 | 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 (ZHONGXING TONGXUN JISHU)
总第141期 第24卷 第4期 2018年8月

专题:5G回传网络光电子器件技术

- 02 5G回传的分组切片网络架构和关键技术研究 赵福川,温建中
- 08 基于CMOS平台的硅光子关键器件与工艺研究 赵瑛璇,武爱民,甘甫烷
- 15 半导体前置光放大器的设计和制作要点 李洵,左成亮,董智星
- 21 面向5G通信的高速PAM4信号时钟与数据恢复技术 廖启文,Patrick Yin CHIANG,祁楠
- 27 高速高密度光电共封装技术 孙瑜,刘丰满,薛海韵
- 33 PAM4技术在光通信应用中的系统分析 朱梅冬,陆建鑫
- 38 数据中心的高速光互连技术 余建军,方凯博
- 42 基于硅基集成的可重构微波光子前端 霍元东,于鸿晨,陈明华
- 46 高速光器件封装技术发展趋势 张一鸣,刘宇,张志珂

专家论坛

- 51 5G无线光模块的需求分析和关键技术 张华,黄卫平

企业视界

- 54 VR的技术发展趋势和行业应用 尹芹,吕达
- 58 OGC视频直播新时代展望 尤琰,张东卓,孟晓斌

Contents 目次

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 24 No. 4 Aug. 2018

Special Topic: Photonic Devices Technologies of 5G Backhaul Network

- 02 Slicing Packet Network Infrastructure and Key Technologies for 5G Mobile Backhaul ZHAO Fuchuan, WEN Jianzhong
- 08 Silicon Photonics Devices and Process Based on CMOS Platform ZHAO Yingxuan, WU Aimin, GAN Fuwan
- 15 Essentials in Design and Fabrication of Semiconductor Optical Pre-Amplifier LI Xun, ZUO Chengliang, DONG Zhixing
- 21 High-Speed PAM4 Clock and Data Recovery Techniques for 5G Communications LIAO Qiwen, Patrick Yin CHIANG, QI Nan
- 27 High-Speed and High-Density Optoelectronic Co-Package Technologies SUN Yu, LIU Fengman, XUE Haiyun
- 33 System Analysis of PAM4 Technology in Optical Communication Applications ZHU Meidong, LU Jianxin
- 38 Optical Interconnecting Technology of Data Center YU Jianjun, FANG Kaibo
- 42 Reconfigurable Microwave Photonic Frontend Based on Silicon Photonics HUO Yuandong, YU Hongchen, CHEN Minghua
- 46 Development Trend of High-Speed Optical Device Packaging Technology ZHANG Yiming, LIU Yu, ZHANG Zhike

Expert Forum

- 51 Product Definition and Enabling Technologies for 5G Wireless Transceiver ZHANG Hua, HUANG Weiping

Enterprise View

- 54 Trends and Industry Applications of VR Technology YIN Qin, LYU Da
- 58 The New Era of OGC Live Broadcasting YOU Yan, ZHANG Dongzhuo, MENG Xiaobin

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。

2018年第1—6期专题

1 5G 承载网技术和优化组网

张云勇 中国联通研究院院长
徐雷 中国联通研究院高级工程师

2 大数据智能化无线网络技术

陈前斌 重庆邮电大学副校长

3 毫米波与太赫兹通信技术及应用

洪伟 东南大学教授
王海明 东南大学教授

4 5G 回传网络光电子器件技术

孙笑晨 苏州洛合镭信光电科技有限公司技术总监
王会涛 中兴光电子技术有限公司规划总监

5 可再生能源供电的无线通信

牛志升 清华大学教授
易芝玲 中国移动通信研究院首席科学家

6 区块链技术及其物联网应用

刘建伟 北京航空航天大学教授

专题:5G 回传网络光电子器件技术

策划人简介



孙笑晨

麻省理工学院材料科学与工程博士毕业;现任苏州洛合镭信光电科技有限公司技术总监,长期从事集成硅光子材料和器件研究和产品化;博士期间曾在实验中首次实现硅基成锗激光激励,毕业后曾先后在美国数家硅光子公司担任资深科学家、技术负责人及公司管理人等职务;发表论文 40 余篇。



王会涛

北京理工大学物理电子学硕士毕业;现任中兴光电子技术有限公司规划总监,先后在中兴通讯股份有限公司、中兴光电子技术有限公司负责光通信系统、光器件产品和技术的开发、规划等工作;曾获得中国通信学会科技进步一等奖和教育部技术发明二等奖;拥有专利 10 余项。

内容导读

随着 5G 商用脚步的临近,5G 承载技术日益成为业界焦点。不同场景下的承载方案逐渐清晰,标准制定在加速,技术研发不断取得突破,全球各大运营商均制定了 5G 部署时间表,预计将在 2020 年开始规模商用。5G 网络峰值带宽和用户体验带宽与 4G 网络相比将有明显提升。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,典型用户数据速率提升 10 ~ 100 倍,峰值传输速率达 10 Gbit/s 或更高,网络综合能效提升 1 000 倍。

5G 业务增长数量级的变化也将带来海量带宽互联的需求,这将使 5G 承载网中光模块速率及用量产生数量级的变化。光模块成本成为制约 5G 承载方案及规模部署的重要因素,业界唯有通过各种技术革新不断提升光模块速率和性能,从而降低单位比特互联成本,方可支撑 5G 的规模建设。

根据 IMT-2020 在《5G 承载需求白皮书》中对 5G 承载网络带宽需求的分析测算:5G 前传网络单基站承载带宽将达到 25 Gbit/s 甚至 $N \times 25$ Gbit/s,中传环路带宽将达到 50 Gbit/s 以上,汇聚核心层带宽将可达到 $N \times 100$ Gbit/s、 $N \times 200$ Gbit/s、 $N \times 400$ Gbit/s。应用于前传的光模块由于光纤资源紧张及室外应用需求,通常要求单纤双向工作、工业级应用环境;应用于中传的光模块将出现单波 50 GE 的需求;而回传则面临着高速较长距离应用的需求。以上应用需求均与传统的光传输、数通/数据中心用光模块有较大的区别。为了低成本实现上述需求,需要从光电子芯片、器件封装、信号处理、模块各个层面来创新解决。

提升光模块速率最简单的方案即是直接提升单通道的波特率,从 4G 时代的 6 GB、10 GB 提升至 25 GB、50 GB。这意味着光电芯片及高速封装的带宽均需成倍提升,不足的部分还需通过驱动器、放大器及信号处理来进行补偿。同时由于高阶调制技术逐步成熟,采用 4 级脉幅调制(PAM4)、离散多音频(DMT)、正交振幅调制(QAM)等高阶调制乃至偏振复用,配合信号处理技术,可以在同样带宽下实现更高的速率。自 400 GE 开始,IEEE 在短距离互联中引入高阶调制 PAM4 技术,目前已经在 2 km 及以下的场景中普遍采用。PAM4 的高阶调制对光器件的线性度、消光比等关键参数都提出了更高的要求,尤其是高阶调制本身引入的约 5 dB 的功率代价,对于 5G 场景中 10 km、40 km 传输距离是极大的挑战,需要进一步提升光器件的出光功率及接收灵敏度。除了提升波特率和调制阶数之外,采用多通道技术提升通道数量是提升光模块速率的重要手段,而低成本、高集成度的新型光电封装技术则是多通道光模块的关键。此外,可调谐激光器技术、单纤双向技术、半导体光放大技术等也是光模块中涉及的关键技术,各项技术组合搭配共同实现低成本高速率光模块,满足不同的 5G 承载应用要求。

本期专题将围绕 5G 承载网络中的关键光电子器件需求、现状、关键技术等展开讨论。专题论文来自中科院、高校及企业等中国主流光电子器件研发单位的专家、学者,从各个视角解读 5G 时代的光电子器件技术,希望能为读者提供有益的参考。在此衷心感谢各位作者对本期专题的大力支持!

孙笑晨 王会涛

2018 年 7 月 20 日



5G回传的分组切片网络架构和关键技术研究

Slicing Packet Network Infrastructure and Key Technologies for 5G Mobile Backhaul

赵福川/ZHAO Fuchuan
温建中/WEN Jianzhong

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

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 04-0002-006

摘要: 研究了5G回传网新型切片分组网络架构和关键技术。在结合分段路由、以太虚拟专用网(EVPN)技术和L3到边缘部署方案的基础上提出极简IP网络技术, 还研究了切片技术、新型光模块技术、网络自动化在5G回传网络中的应用。提出将这些新技术有机融合在一起的新型自动化5G回传网络架构, 为5G回传网络的技术发展和网络建设提供重要依据。

关键词: 5G承载; 回传; FlexE; 分段路由; EVPN; 网络切片; 软件定义网络(SDN)

Abstract: The new slicing packet network infrastructure and key technologies for 5G backhaul network are introduced in this paper. Integrating the segment routing, Ethernet virtual private network (EVPN) technology and L3 to edge deployment scheme, the minimized IP network technology is proposed. Meanwhile, the application of slicing technology, new optical module technology and network automation in 5G backhaul network are studied. Then a new automatic 5G backhaul network architecture which organically integrates these new technologies is put forward. And this architecture provides an important basis for 5G backhaul technology development and network construction.

Keywords: 5G bearing; backhaul; FlexE; segment routing; EVPN; network slicing; software defined network (SDN)

1 5G回传的承载需求和 分组切片网络架构

4G改变生活, 5G改变社会。5G的“万物互联”带来的不仅有移动通信网络的性能提升, 还有一些新的商业应用模式, 支持包括增强移动宽带(eMBB)、超可靠低时延通信(uRLLC)和海量物联网通信(mMTC)三大应用场景, 5G基站回传的带宽相对4G提升10倍以上, 时延需求比4G降低10倍以上, 连接数量相比4G提升10倍以上, 性能指标的提升推动承载网技术的发展。

5G基站回传接入带宽迅猛增加, 使得回传业务量达到数百吉比特每秒到数太比特每秒。5G核心网整体架构相对4G的变化主要体现在核心网云化, 控制和转发分离, 核心网用户面功能(UPF)可以分布式部署。5G核心网引入了移动边缘计算(MEC), 通过本地化分流减小时延和

传输开销, 增强不同类型的业务体验, UPF和MEC可以按需下沉到汇聚层或综合业务接入点。在这个架构下回传网络的部署方案从集中式向分层分布式网络演进, 网络的连接相对4G更加复杂, 倾向于网状网化。

为了降低单比特传输成本, 需要采用低成本的新型光模块支撑海量带宽的传输, 同时运营商希望在一张承载网上实现包含5G eMBB、uRLLC和mMTC业务, 政企专线和固网宽带在内的综合业务承载, 实现统一的运维。不同业务对承载网络服务质量(QoS)要求存在较大差异, 如何实现不同业务的隔离, 满足大带宽、低时

延和灵活大连接的业务需求, 现有承载网的架构和技术面临较大的挑战。

4G的承载网是基于IP的分组传送网络架构, 业务隔离技术采用的是虚拟专用网络(VPN)的地址空间隔离方案, 各种业务共用一张公网, 并通过QoS/H-QoS提供业务连接的服务质量保证。传统的IP网络QoS模型则是建立在统计复用的基础上, 转发时延与流量突发和缓存设置相关, 难以提供有边界的时延和时延抖动保证。

新一代5G切片分组承载网络采用高效的以太网内核, 通过L0—L3多层网络技术融合, 实现IP、以太网

收稿日期: 2018-07-09

网络出版日期: 2018-08-08

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX03001016)

和固定比特率(CBR)业务的综合承载,层网络模型如图1所示。

其中,切片分组层提供对 L1/L3 业务的寻址、转发和封装处理,在分组层通过分段路由(SR)隧道技术建立业务连接,切片通道层提供 L1 层的硬管道业务连接,为分组层提供低时延确定性网络通道。切片传输层采用光互联网论坛(OIF)灵活以太网(FlexE)技术和 IEEE 802.3 以太网技术,利用新型光模块技术和以太网的产业链优势,支撑大带宽低成本建网,支持以太网+密集型光波复用(DWDM)技术,实现 10 Tbit/s 以上传输容量和长距离传输^[1-2]。

5G 切片的分组承载网的架构如图2所示。

移动回传网络包含接入层、汇聚层和核心层 3 个层次。在回传网络接入层,基于硅光及 4 级脉幅调制(PAM4)技术的非相干 50 GE 以及 100 GE 新型光模块技术引入,将有助于降低大带宽的组网成本。在回传网络的汇聚和核心层,中长距离的组网需求驱动基于硅光的彩光相干 100 GE、200 GE、400 GE 光模块融合 DWDM 技术的引入和应用,使得单纤

或单端口的容量可扩展至数 T 级别。5G 业务是逐步发展的,承载网络线路侧带宽可根据业务需求逐步扩展, FlexE 的物理链路捆绑扩容技术可以提供一种带宽平滑扩容的解决方案,帮助运营商分阶段进行网络投资,降低初期投资成本^[3]。

2 5G 承载关键技术和解决方案

2.1 极简 IP 网络技术

5G 回传网推动 L3 下沉到网络边缘,为了简化 L3 下沉带来的网络运

维复杂性和成本,需要引入极简的 IP 网络技术,如图3所示。

SR 是一种源路由技术,SR 隧道的信息只存放在路径的头节点,路径上的其他节点不感知业务,无需为连接维护状态,仅在头节点修改 SR 标签栈就可以对业务路径进行调整。采用 SR 技术可大大简化转发面的信令控制协议,实现路由控制和转发面的解耦,结合 SDN 控制器可以很好地实现网络编程能力。由控制器维护全局的拓扑和流量工程信息,根据业务请求和路由路径策略计算形成满足条件的业务路径,并根据网络状态

图1▶
切片分组网络层
网络模型

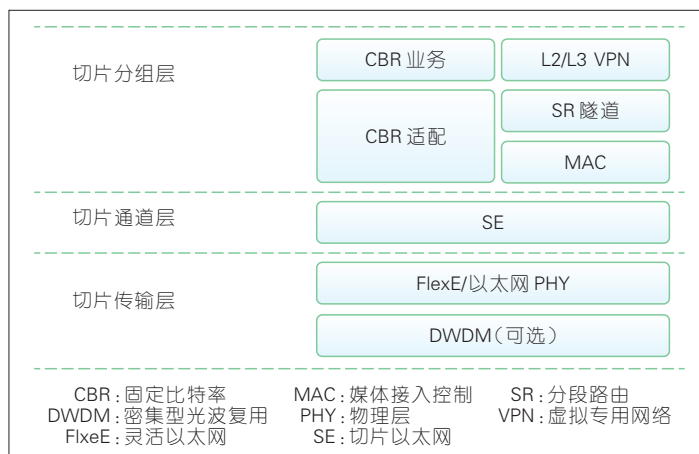
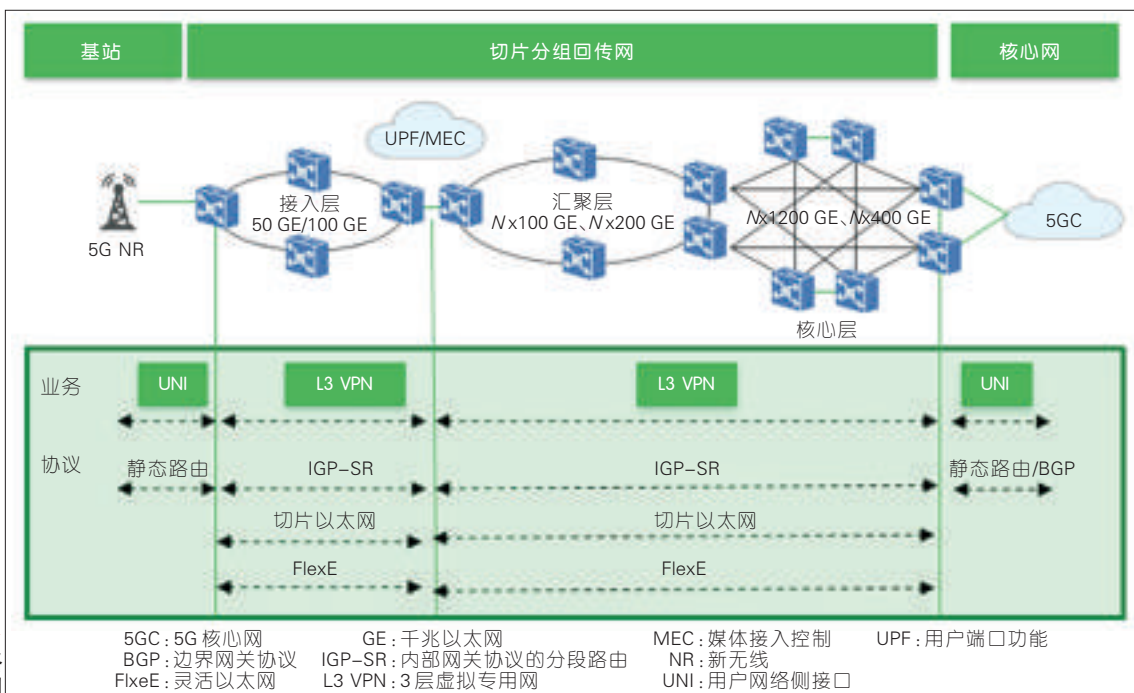
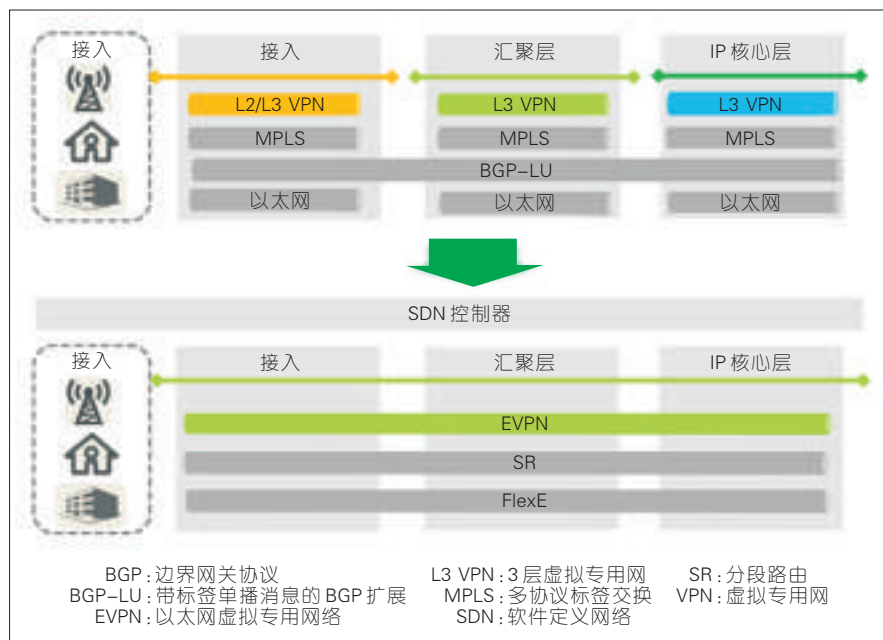


图2▶
5G 移动回传网络
架构图





▲图3 极简IP网络技术

实时调整路径,实现业务闭环控制^[4]。

SR的传送应用(SR-TP)是在SR隧道基础上面向传输运维增强的技术。传统的SR流量工程(SR-TE)隧道是单向的,只在源节点维护隧道路径信息,无法实现双向隧道关联,提供物理同路径的双向端对端隧道的操作管理维护(OAM)检测能力。SR-TP通过在隧道标签栈内层再增加一层路径标识标签来实现双向隧道关联,在SR-TP上继承了传统多协议标签交换传送应用(MPLS-TP)OAM,可实现传输隧道双向OAM的检测能力,既有利于运维,又具备与传统MPLS-TP网络的兼容能力。

以太网虚拟专用网络(EVPN)是一种能替代传统虚拟专用局域网业务(VPLS)提供2层VPN业务的技术。EVPN克服了传统网络中大量的广播/未知播/组播(BUM)报文占用带宽资源,并在网络拓扑变化后,媒体接入控制(MAC)/地址解析协议(ARP)收敛速度慢的问题^[5]。EVPN还解决了VPLS业务可扩展性差、带宽利用率不高、运维复杂等一系列的问题。EVPN还扩展RT5路由实现了L3VPN功能。这样在业务层面,采用

EVPN技术则可以实现L2/L3 VPN的统一控制。

SR和EVPN分别作为网络层和业务层的全新技术,不但解决了之前网络面临的扩展性、灵活性和易用性的问题,其高效和统一的控制面还实现了极简网络的部署。同时,两者都可兼容已有的MPLS网络,与软件定义网络(SDN)实现无缝融合,是5G回传灵活大连接的有效解决方案。

2.2 承载切片技术

5G的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。不同的切片提供不同的网络功能和特性,切片对承载网的QoS、业务隔离和可靠性提出了更高要求。传统的承载网共用一张公网,网络资源的预留和路由计算能力难以满足切片的要求^[6]。

5G承载切片的网络架构如图4所示。

承载网网络切片是通过业务驱

动形成的对网络拓扑资源(如:节点转发表项、缓存、端口、子端口等)的预留和抽象,按需组织形成多个虚拟网络vNet,每个虚拟网络对应于特定的转发资源和拓扑,不同虚拟网络之间可以采用硬隔离或者软隔离方式,取决于需求。在切片分组网络中的硬隔离技术包括物理端口、FlexE客户端子接口以及由分层以太网创建的硬管道,如图5所示。

切片以太网技术(SE)将以以太网组网技术从L2扩展到L1,客户业务在源节点映射到特定的FlexE客户端,在中间转发节点则基于SE进行66 bit块的交叉,在目的节点从FlexE客户端解映射出客户业务,这样在L1层可以建立一条从源到宿的端对端传输路径。这个切片技术在以太网上提供了具有比特透明、超低时延和确定性网络性能,可以很好地满足5G uRLLC和大客户专线业务的承载要求。

软隔离主要是利用分组网的H-QoS和时间敏感网络(TSN)技术预留隧道所需的转发资源。软隔离技术的特点在于可以实现带宽的统计复用,其中IEEE TSN中提供了MAC层低时延业务调度的优先级抢占调度机制,可以改善低时延业务的性能。

2.3 新型光模块技术

5G承载网切片传输层最大的挑战是海量的带宽增长,而带宽的增长势必带来光模块成本的大幅增加,因此5G阶段新型光模块技术的关键需求是降低每比特、每千米的传输成本和功耗。针对传输技术适应市场对带宽增长的需求,未来对新型光模块技术的需求如下:

(1)直接提升信号波特率,提升传输带宽,例如:波特率从4G时代的6 GB/10 GB,提升至25 GB甚至可以到56 GB。

(2)采用高阶调制及数字信号处理技术,提升频谱效率和传输性能。从传统的归零码(NRZ)走向高阶

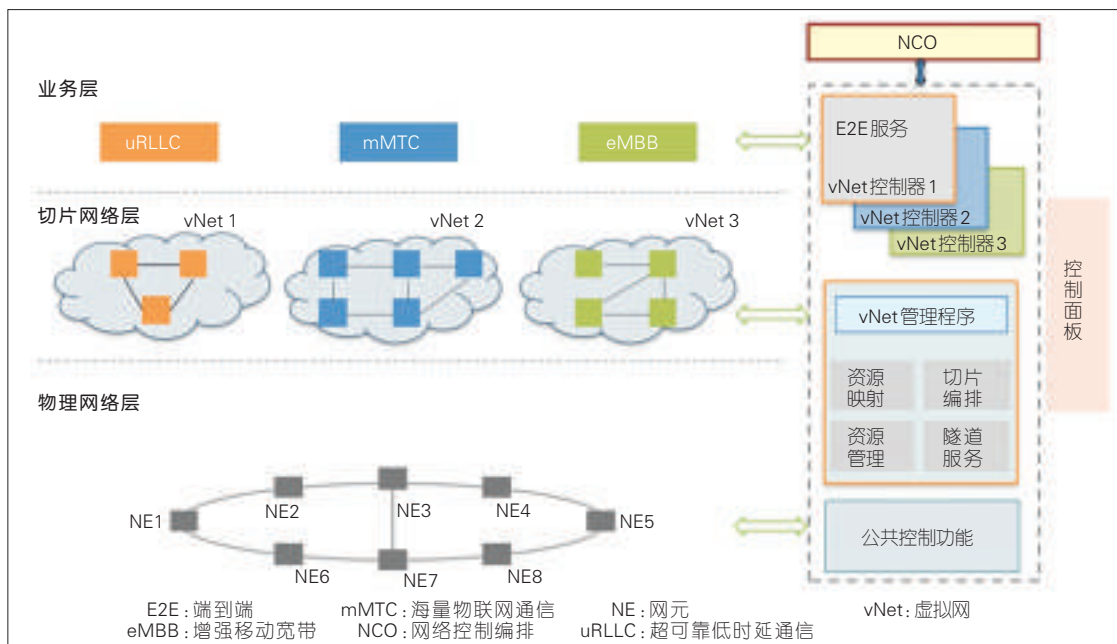


图4
切片分组网络架构

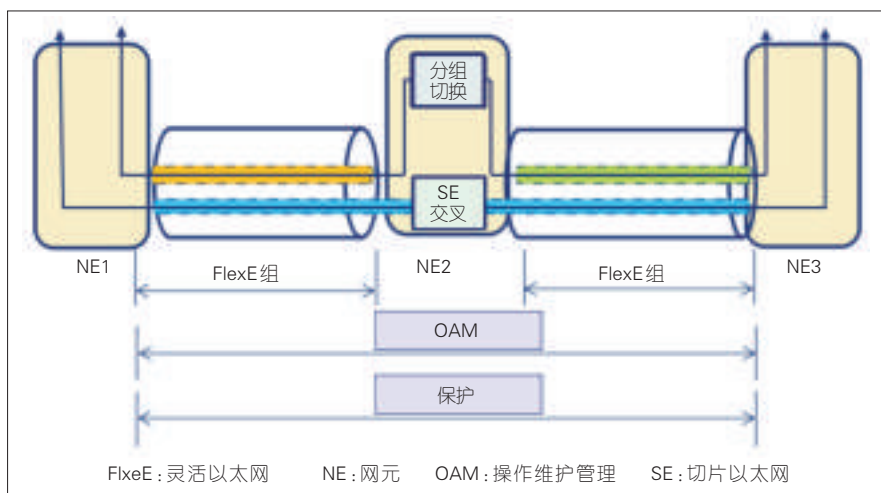


图5 切片分组网络的硬管道隔离技术

调制,如短距场景下采用PAM4、离散多音频(DMT)调制技术等,长距场景下采用正交相移键控(QPSK)/正交振幅调制(16QAM)相干调制技术等。

(3)提升光器件集成度,增加波长和通道数量,例如:采用 $N \times 25$ G、 $N \times 50$ G甚至 $N \times 100$ G集成。

(4)基于硅光技术、光电集成封装的高集成、小封装、低功耗的低成本光器件技术。通过技术创新降低器件的功耗和成本。

5G承载网城域网应用光纤传输距离一般在10~80 km,应用场景从接

入层到汇聚/核心层。接入层组网集中在40 km以内,主要是10 km以内的短距组网应用场景;汇聚/核心层组网集中在40~80 km的中长距组网应用场景;核心网组网集中在80 km左右的长距应用场景,部分应用场景可能需要支持80 km以上,甚至达到100 km的传输距离。光模块主要可以分为10 GE、25 GE、50 GE、100 GE、200 GE、400 GE等多种速率。光模块封装一般选择小型外形封装可插拔光模块(SFP+)/SFP28/四通道的SFP(QSFP 28)/100 G技术外形封装可插

拔模块(CFP)/CFP2/CFP8等封装。

如图6所示,5G承载网接入层以 $N \times 50$ GE/ $N \times 100$ GE速率为主,具体采用50 GE还是100 GE,业界还有争论,取决于光模块吉比特成本、产业链成熟度及应用场景。业界50 GE光模块主流标准封装类型是SFP 56,限于封装体积较小,目前最大只能支持到10 km的传输距离;而采用QSFP 28封装的50 G光模块为非标准方案,其产业链暂不够成熟,竞争不充分,成本相对较高,且短期内大幅度降成本可能性较小。而与之同封装类型的100 G QSFP 28为标准方案,产业链相对成熟,吉比特成本是50 GE光模块的一半,后续随量的增加,成本会进一步降低。同时,业界已推出了基于硅光的100 G QSFP 28单载波光模块,规模商用后其成本优势非常明显。因此,从网络运营效率看,接入层首选为100 GE。100 GE业务广泛应用于运营商市场,在数据中心也是主流业务。至于50 GE光模块还有待产业链进一步成熟和明晰。

5G承载网汇聚层以 $N \times 100$ GE、 $N \times 200$ GE速率为主,100 G产业链相对比较成熟,传输距离目前可以覆盖承载网城域网应用,主要包括40 km和

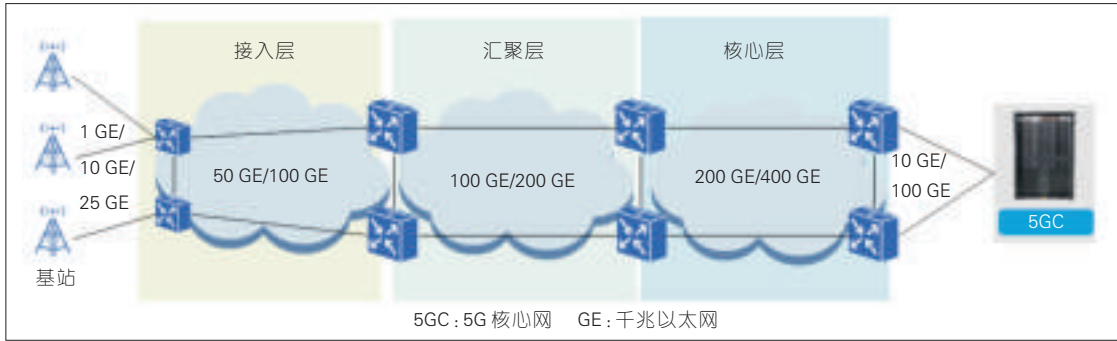


图6 5G承载网网络分层及组网速率需求

80 km长距组网场景。200 GE光模块业界主流技术同时支持100 G/200 G的速率，OIF近期发布了采用数字相干技术的CFP2 (DCO-CFP2)相干标准草案《IA # OIF-CFP2-DCO-01.0 Draft》，定义了DCO-CFP2实现100 G、200 G、300 G、400 G以太网及光传送网(OTN)应用，电口为 $N \times 25$ G，兼容 $N \times 50$ G PAM4，这给系统设备及网络升级维护带来极大的方便。

5G承载网核心层以 $N \times 200$ GE、 $N \times 400$ GE速率为主，400 G非相干技术标准已于2016年发布，OIF 400 G ZR DWDM相干技术草案《400 G ZR IA # OIF-400ZR 0.6-Draft》也于2018年初发布，目标400 G-DCO 80 km，加OA可达120 km。目前业界400 G光模块光电接口有多种实现方式，对应

多种封装形式。根据具体应用场景不同，业界对400 G封装选择争议较大，市场需求暂不明晰。基于此，400 G在5G承载网初期可以选择技术更加成熟的 16×25 G Serdes方案，在未来基于50 G PAM4 Serdes芯片技术成熟后，可有更多选择。

2.4 5G自动化回传网络架构

5G是开放的网络，它面向垂直行业的各种应用，推动各行业的数字化转型，提升产业化的效率。5G网络通过终端、无线、承载和核心网的端对端切片提供各种业务功能和网络特性。回传网络的自动化是业务闭环的一个重要环节，网络自动化的架构如图7。

回传网络采用管控合一云化系

统支撑端到端业务快速上线，实时感知用户体验，预测性分析和主动优化，实现全流程的智能自动化，有效解决5G时代网络应用给承载网带来的诸多挑战。回传网络自动化体现在以下几个方面：

(1)快速建设和业务部署自动化。采用网络规划工具对基础设施进行设计，实现网络部署ZeroTouch，业务规划工具提供端到端业务流程的设计，实现运营商业务可编程。客户通过APP订阅业务、控制器/编排器自动开通业务，实现业务开通ZeroTouch。

(2)智能保障。基于人工智能(AI)知识的保障解决方案，包括告警、性能采集模块、知识库模块、策略中心模块、网络监测控制模块以及网

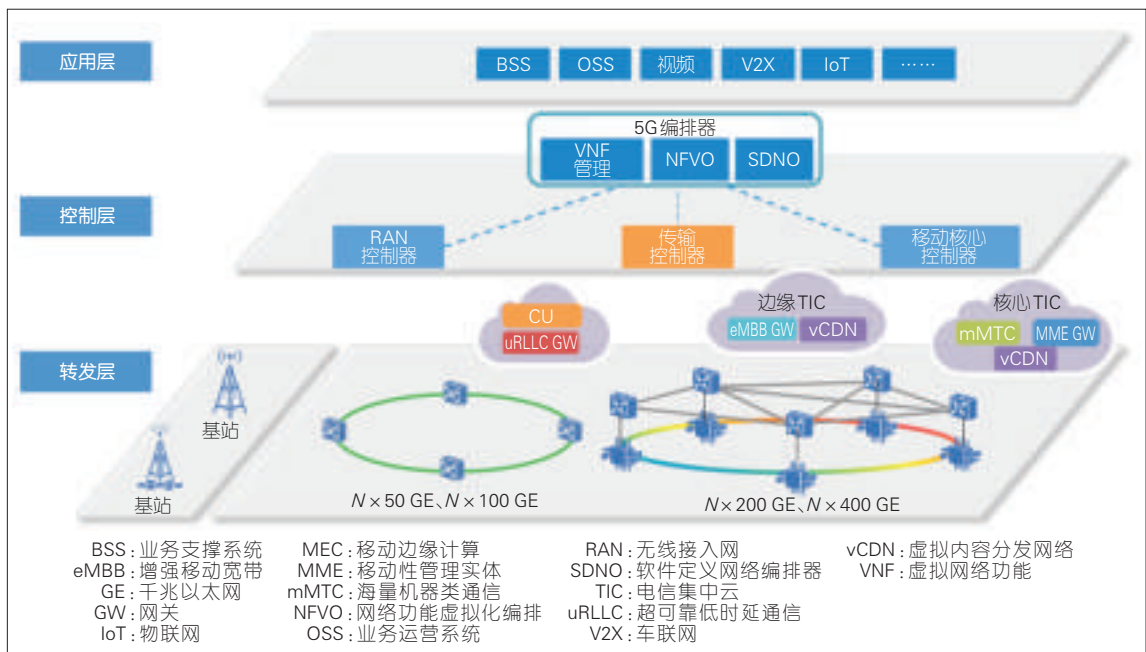


图7 5G端到端网络自动化技术架构

络自愈模块,可以实现实时网络状态监测、telemetry 自动测量,并可以依据知识的故障准确定位,进行业务自我修复,网络保障处理时间由天变秒,效率得到指数级提升。

(3)流量预测。基于历史流量数据的分析及优化算法,可实现对流量的忙时及闲时预测、未来预测。其中忙时及闲时预测,引导新建网络合理地网络资源分配,引导旧网络更好地运维;未来预测则可以提前预测流量高峰,及时进行网络调整和扩展,提高运维效率,自动、智能和准确地获取网络流量预测。

(4)业务自愈。针对多节点、多链路故障场景,系统依据故障影响业务分析,自动智能化计算恢复路径和资源优选,进行业务恢复动作并通告业务恢复正常。针对网络劣化场景,系统依据告警劣化与性能劣化分析,判断网络风险,在必要时实施故障预案,如对业务增加保护或预置路由,故障发生时基于预案自动恢复业务。

(5)端到端协作。基于统一信息模型、可视化设计、自动化测试完成切片设计闭环,构建跨无线接入网

(RAN)、核心网(CN)、骨干网(BN)的网络切片自动化闭环保障,实现统一的端到端(E2E)切片编排管理,面向客户的端到端切片服务。对承载网,需要匹配网络分片需求,提供不同分片之间的严格隔离,并与无线、核心网统一编排实现分片管理的自动化。

3 结束语

本文介绍了面向 5G 回传的分组网架构和关键技术。切片分组网是一个融合 L0—L3 的多层融合网络,采用以太网作为物理层,通过新型光模块及光电子器件技术实现低成本、海量带宽的传输,并支持 SR-TP 源路由隧道、EVPN 的极简 IP 网络,还可以通过软硬隔离的网络切片满足不同类型业务的网络服务等级协议(SLA)要求,通过开放的 SDN 集中管控、大数据和 AI 融合实现网络的自动化,支撑满足 5G 网络的开放、敏捷和高效的新型运维体系。

参考文献

- [1] OIF. Flex Ethernet Implementation Agreement: OIF-FLEXE-01.0[S].2016

- [2] IETF. Segment Routing Architecture:draft-ietf-spring-segment-routing-10[S]. 2016
 [3] 程伟强.切片分组网络(SPN)总体技术要求研究报告[R]. CCSA, 2018
 [4] 黄金日,段然. 迈向 5G C-RAN:需求、架构与挑战[R].2016
 [5] China Mobile, Huawei, Deutsche Telekom, et al. 5G Service-Guaranteed Network Slicing: White paper V1.0[R]. 2017
 [6] LI H, HAN L, WANG L. Analysis of the Synchronization Requirements of 5G and Suggestion on New Network Reference Model:CONTRIBUTION 2099 R1[R].2016

作者简介



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 IPRAN 产品规划;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 项等;申请专利 10 余项。



温建中,中兴通讯股份有限公司承载网产品规划经理;主要研究方向为 5G 承载、PTN 和 IPRAN 产品规划;参与国家科技重大专项课题 1 项,参与 IMT-2020 5G 承载工作组工作,申请专利 10 余项。

基于 CMOS 平台的硅光子关键器件与工艺研究

Silicon Photonics Devices and Process Based on CMOS Platform

赵瑛璇/ZHAO Yingxuan
武爱民/WU Aimin
甘甫烷/GAN Fuwan

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)
(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

随着集成电路面临摩尔定律失效的风险, 面向片上光互连的硅光子技术成为重要的关键平台性技术, 能够解决集成电路持续发展所面临的速度、延时和功耗等问题。在未来 5G 通信中也有明确的用途, 基站的数据前传和后传需求显著, 低成本、大批量的高速光模块有望成为硅光子的重要产业出口。硅光子技术通过微电子和光电子技术的高度融合, 在硅基衬底上实现各种有源和无源器件, 并通过大规模集成工艺实现各种功能, 文中我们将介绍基于互补金属氧化物半导体 (CMOS) 的硅基光器件的研究和工艺。

1 硅基关键器件与工艺研究

1.1 硅基光波导和制造工艺研究

与先进的超大规模集成电路工

收稿日期: 2018-07-02

网络出版日期: 2018-07-30

基金项目: 科技部重点研发计划 (2016YFE0130000); 上海市自然科学基金 (16ZR1442600); 上海市扬帆计划 (18YF1428100)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 04-0008-007

摘要: 面向互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺兼容的硅基光互连体系, 研制了包括光波导、光栅耦合器、刻蚀衍射光栅、偏振旋转分束器、光频梳以及 3D 互连新器件等的硅光子关键器件, 并对相应器件的设计及工艺给出了最新的研究结果。基于以上关键硅光子器件进行了大规模光子集成, 实现了片上集成的微波任意波形发生器, 并集成了 300 多个光器件, 包括高速调制、延迟线和热调等功能。面向数据通信研制了八通道偏振不敏感波分复用 (WDM) 接收器, 解决了集成系统中的偏振敏感问题。

关键词: 硅光子技术; 硅基光互连; 大规模光子集成

Abstract: The core components for silicon-based optical interconnection system compatible with complementary metal oxide semiconductor (CMOS) platform is developed, including optical waveguides, grating couplers, etched diffraction gratings, polarization rotator-splitters, optical combs, and new devices for 3D optical interconnections. Based on the key silicon photonic devices, a large-scale photonic integration has been carried out to realize the on-chip integrated microwave arbitrary waveform generator, and more than 300 optical devices, including high-speed modulation, delay line and thermal modulation functions, have been integrated. An 8-channel polarization insensitive wavelength division multiplexing (WDM) receiver for data communication is developed, which solves the polarization sensitivity problem in integrated system.

Keywords: silicon photonics technology; optical interconnections; large-scale photonics integration

艺兼容是硅光子最本质的价值所在。经过半个世纪的发展, 集成电路制造工艺水平突飞猛进, 量产产品已达到 10 nm 技术节点。本研究小组与先进的大规模集成电路商用工艺生产线合作, 基于 0.13 μm CMOS 技术, 并且采用了 248 nm 光刻技术^[1], 建立了一整套硅光子器件加工和集成的工艺。

硅基光波导是硅光子器件和芯片最基本的单元, 波导的传输损耗是衡量技术平台的重要参数之一。对

于光波导来说, 传输损耗通常主要由材料吸收损耗, 衬底泄露损耗, 侧壁粗糙导致的散射损耗组成。由于光刻、刻蚀等工艺导致硅基光波导侧壁粗糙, 从而使光在波导侧壁处产生散射损耗, 这成为硅基光波导的主要损耗。为降低传输损耗, 我们进行了如下优化: 首先减小由于光刻工艺导致的侧壁粗糙, 为减小曝光过程中的驻波效应, 通常在涂光刻胶之前先在衬底上涂敷一层抗反射层, 以减小衬底反射。

在刻蚀工艺方面,采用等离子增强反应离子束刻蚀(ICP-RIE)设备,以SiN薄膜作为刻蚀掩模。为实现陡直形貌,通常采用干法刻蚀技术,但是离子轰击通常会导致侧壁粗糙,因此需要通过选择合适的气体组分实现生成聚合物对侧壁进行保护。我们采用HBr/O₂作为主要的刻蚀气体,并通过调节HBr/O₂的比例,控制聚合物厚度,实现垂直形貌和平滑界面^[2]以进一步减小侧壁粗糙^[3],同时采用热氧化工艺^[4]对晶圆进行处理,氧化层厚度为10 nm。

为同时实现条形波导和脊形波导2种波导,将220 nm顶层硅刻蚀分解为2步刻蚀工艺:首先在绝缘衬底上的硅(SOI)晶圆上生长一层氮化硅层,该氮化硅层作为后面硅刻蚀步骤的掩膜层。由于氮化硅层与硅晶圆之间的应力系数不匹配,为缓解氮化硅与硅晶圆之间的应力,在生长氮化硅层之前通常先在硅晶圆上生长一薄层SiO₂来做为缓冲层;接着再采用248 nm深紫外光刻,在晶圆上定义出硅波导区域,并采用ICP-RIE将不需要的氮化硅掩膜层去掉,该步的刻蚀工艺采用光刻胶作为刻蚀的掩膜层;然后,为实现脊形波导结构和条形波导结构,进行第2次光刻,在脊形波导处光刻胶将氮化硅掩膜覆盖住,而在条形波导处,光刻胶通过显影方法去掉,然后进行第1次硅刻蚀;再将上一次刻蚀的光刻胶去除后,不经过光刻,整个晶圆进行第2次硅刻蚀,经过该步刻蚀工艺之后条形波导和脊形波导2种波导结构同时实现。通过湿法腐蚀去除SiN掩膜层后,光波导基本结构已经实现。

经过不断地设计和工艺优化,在1 550 nm波长处,单模硅纳米线光波导对横电磁波(TE)模式及横电波(TM)模式传输损耗为2.4±0.2 dB/cm和0.59±0.32 dB/cm,脊形光波导的损耗受脊形波导的宽度和浅刻蚀深度影响非常显著,全球主流的工艺平台通过设计优化,传输损耗通常可以做

到1 dB/cm。

1.2 CMOS工艺兼容多晶硅栅层的光栅耦合器

光集成芯片的输入/输出(I/O)接口主要涉及集成光波导与光纤之间的衔接与匹配问题,由于硅($n=3.5$)与二氧化硅($n=1.5$)之间巨大的折射率差,使得硅基纳米线波导的尺寸通常在亚微米量级,导致光纤与波导之间存在着巨大的模式失配。我们利用标准CMOS工艺的晶体管中的多晶硅栅层,从而无需对CMOS工艺流程进行改动,实现光栅耦合器^[4-5],大大地降低了光电单片集成的工艺复杂程度。

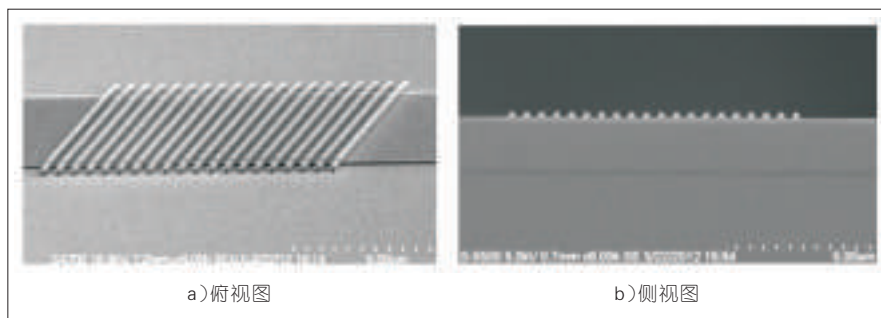
工艺中使用的SOI晶圆顶层硅的厚度为220 nm,埋氧化层的厚度为2 μm。在SOI晶圆上淀积一层SiN做为掩膜层,接着采用深紫外曝光技术及ICP-RIE在晶圆上形成硅光波导及金属-氧化物-半导体(MOS)晶体管的有源区,有源区之间由隔离区隔开,然后采用高密度等离子体淀积(PECVD)技术在隔离区中填充SiO₂,为了后续的光刻技术,利用化学机械抛光(CMP)对晶圆进行平坦化处理。上述步骤中淀积的SiN层作为CMP的阻挡层,CMP后采用湿法腐蚀的方法用热磷酸去除剩余的SiN层;去除SiN层后,在晶圆上采用热氧化技术生长一薄层SiO₂作为MOS晶体管的栅氧化层,并淀积一层多晶硅层作为晶体管的栅极;之后采用DUV光刻及刻蚀形成晶体管的栅极,此时光栅耦合器也同时形成。在完成晶

体管所需要的离子注入、退火等其他工艺后,淀积一层SiO₂作为保护层,并进入金属化等后端工艺流程。如图1所示为最终加工得到的基于多晶硅的光栅耦合器。

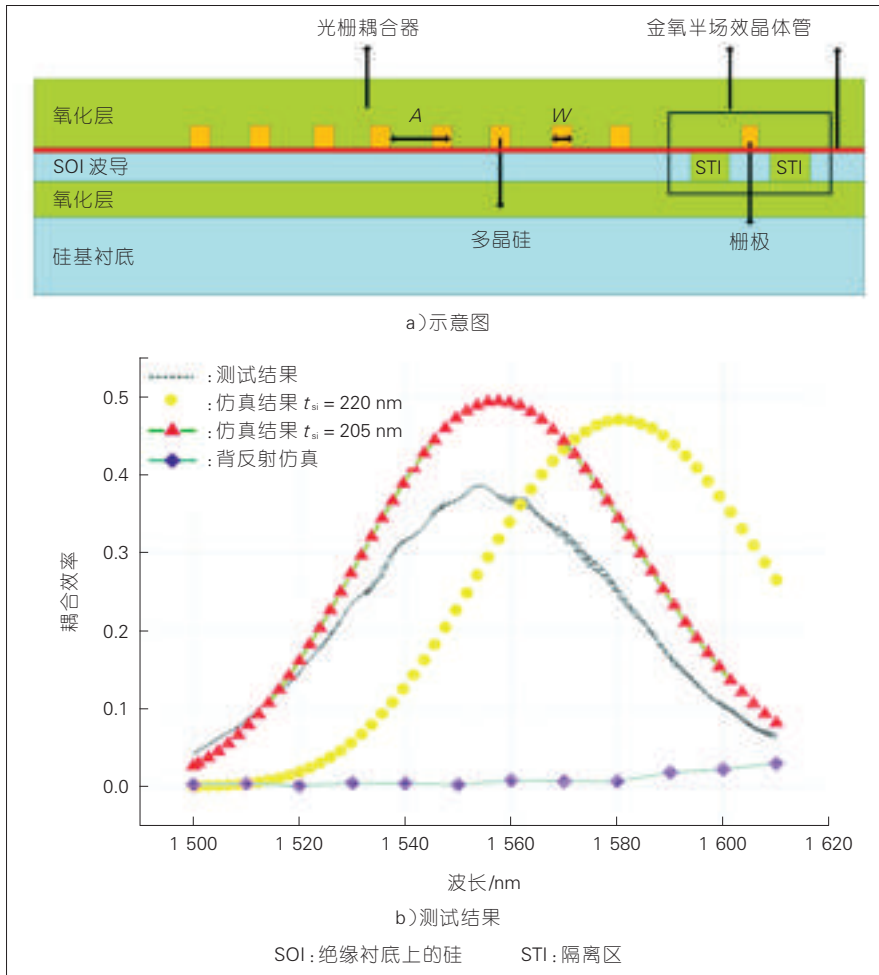
经过测试,对于周期为0.58 μm、多晶硅宽度为0.25 μm的光栅耦合器,峰值耦合效率位于1 550 nm波长处,其耦合效率约为39%,3 dB带宽大于60 nm,如图2所示。其对应的仿真耦合效率峰值耦合效率大约在1 580 nm处,约为45%。为进一步提高耦合效率,可以在光波导层引入全刻蚀的深槽,由于全刻蚀的深槽可以与光波导及晶体管的隔离区(STI)同时形成,因此制造工艺流程并不发生改变。通过合理设计光栅周期,从全刻蚀深槽向上衍射的光与从多晶硅向上衍射的光发生干涉相涨,而向下衍射的两束光发生干涉相消,从而使光栅耦合器的向上衍射效率得到提高,最终改善耦合效率。

1.3 CMOS兼容的热调谐平面硅蚀刻衍射光栅

光互连的一大优势是可以采用信息复用技术提高通信带宽密度,增加通信容量。目前主要的信息复用技术有波分复用(WDM)、偏振复用(PDM)和模分复用(MDM)等。其中WDM是应用最广泛的复用技术,它是将不同波长携带的不同信号加载到同一根光纤中提高光纤传输带宽。波分复用器在超高速、大容量波分复用系统中起着关键作用。其中硅蚀刻衍射光栅(EDG)器件具有面



▲图1 基于多晶硅栅极的多晶硅光栅耦合器



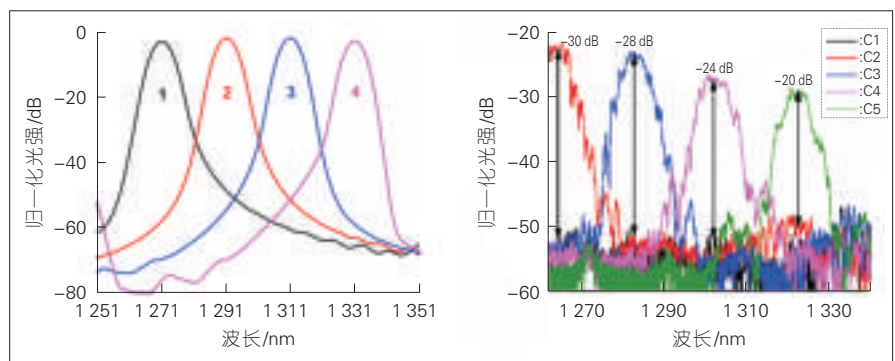
▲图2 基于多晶硅的光栅耦合器示意图及测试结果

积小、齿面数量多、间距小、单边输入输出等特点,具有高密度集成、高质量成像、高精度通道频谱等优点。

我们进行了刻蚀衍射光栅频谱平坦化设计。考虑到工艺容差和性能方面的要求,在设计中我们通过改变输入波导结构的方法来实现 EDG 通道频谱平坦化,在入射波导端引入级联的梯形绝热波导和多模干涉结构(MMI)。在本次的优化设计中,取 MMI 长度为中心波长 1×2 自成成像长度, $L_{MMI} = 3L\pi/8$,通过优化输入/输出波导宽度、MMI 宽度来实现频谱平坦化设计^[6]。

通过参数优化后仿真结果显示:中心通道 1 dB 带宽为 12 nm,插入损耗约为 5 dB,通道串扰约为 40 dB,如图 3 所示。

对于 EDG 器件,工艺方面的影响主要表现在光刻精度、侧壁垂直度和顶层硅厚度变化等方面。光刻精度变化是由于掩模板像素精度有限,在弯曲波导和光栅面处会有起伏,从而导致器件侧壁粗糙和圆角效应,进而增加弯曲波导的传输损耗和光栅的



▲图3 频谱平坦化后器件各通道传输光谱示意图

反射效率。而 EDG 最重要的部分闪耀光栅具有相当数量的光栅面和尖角,因此光刻精度对器件性能起着至关重要的影响。侧壁垂直度变化是由工艺制作过程中的横向刻蚀导致,一般采用干法刻蚀可以保证很好的垂直度,但矩形光波导需要对芯层进行全刻蚀,这种刻蚀对工艺要求非常高,难以保证精确的垂直度。由于工艺偏差的存在,光栅面通常不会精确刻蚀成垂直面,会有一定的倾斜度进而引入部分损耗。对于 SOI 晶圆,顶层硅厚度会有少许起伏,而且这种起伏在晶圆表面呈不均匀分布,因此对于每一个 EDG 器件,随着晶圆上位置的不同,顶层硅厚度会有不同的变化,进而对器件性能产生不确定的影响。为了减小这种影响,对设计的 EDG 进行了容差分析,并做了相应的热光调制分析和设计。热光调制利用的是硅的热光效应,即硅材料的折射率会随着温度的变化而变化。我们首先设计在工艺上可行的热光调制模型,电极通过电流产热对下方波导进行加热,随着波导温度的升高,硅折射率增大,波导有效折射率增大,进而对器件进行热光调制。根据硅的热光效应我们可以计算出硅折射率和平板传输区。有效折射率随温度变化的相应值,可仿真 EDG 对应的通道偏移量,得到硅层温度每上升 50 K,通道波长偏移约为 3.2 nm。

1.4 偏振旋转分束器

SOI 波导材料有着比普通集成光

波导更大的折射率差,使得波导的 TE 和 TM 模式有效折射率差别很大,造成器件具有偏振敏感特性;而光纤中光的偏振态是随机的,因此必须妥善解决硅光子器件的偏振敏感问题,否则硅光子学将无法实现传统集成光学那样复杂的回路或网络,更加无法实现光互连替代电互连的目标。目前最有前景的解决方案是偏振分集机制^[7],其中的核心器件是偏振旋转分束器。为了满足工程应用需求,我们使用双层模式转换器和反向锥形耦合器实现 CMOS 工艺兼容的超大带宽和大工艺容差偏振旋转分束器(PSR)^[8]。相应的机构图如图 4 所示。

我们选择顶层硅厚 220 nm、浅刻蚀 130 nm 标准硅光子工艺平台。为了方便与其他矩形波导集成,采用双刻蚀波导以打破横截面对称性,并设计双层锥形模式转换器实现 TM₀ 到 TE₁ 模式间的转换。同时,为了实现用于光纤到户(FTTN)系统的大带宽模式转换器,我们分别在 1 310 nm 以及 1 550 nm 双波长下对器件参数进行设计优化。利用模式转换器将 TM₀ 模式转换成 TE₁ 模式后,采用定向耦合器将 TE₁ 模式与 TE₀ 模式分离,同时将 TE₁ 模式转换成 TE₀ 模式,达到最终的偏振分束与旋转功能。其中,定向耦合器基于干涉原理工作,并需要满足严格的相位匹配条件,这与波长和器件尺寸均有关,这就导致其工作带宽和制作容差相对较小。为了提高器件工作带宽和制作容差,可以采用反向锥形耦合器,它主要基于模式衍化原理工作^[9]。当波长或波导宽度发生小范围的变化时,有效折射率交叉点只会发生偏移,不会消失,模式耦合将会正常进行,对器件性能影响不大。因此,该结构具有大工作带宽和工艺容差的优点,但这是以牺牲器件长度

为代价。本文中我们所设计的偏振旋转分束器总长约为 273 μm。

图 5 为测试结果,受测试条件限制,仅在 1 550 nm 波段内进行测试。测试结果显示:该器件具有大带宽的工作特性,可在 1 470 ~ 1 580 nm 范围内工作,在 TE/TM 模式输入的条件下,插入损耗分别为 0.7 dB/0.73 dB,串扰分别为 -12.1 dB/-14.7 dB,具有低损耗、低串扰特性。

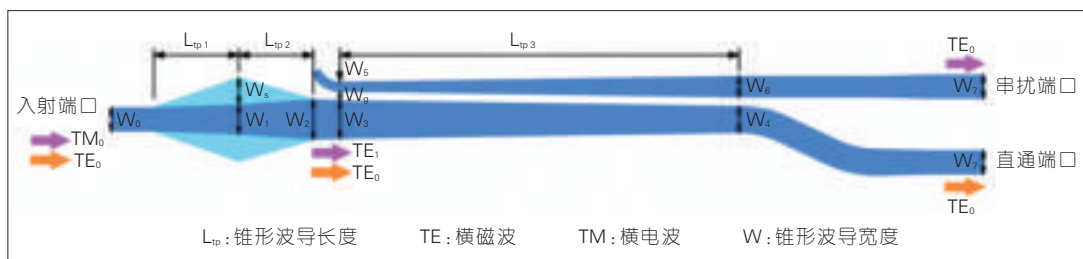
1.5 光频梳

光频梳是指一束有很多频率的光,而这些光的频率间距是一样的,它的重要应用包括可以利用一个泵浦光源产生多个频率的激光输出。如果光频梳的频率间距跟光通信中的通道间距一致,比如说 100 GHz,那么光频梳就可以作为光通信中的波分复用光源。目前的关键技术难点是:芯片上的光频梳需要厚的氮化硅膜,这是因为光频梳的产生需要有反常色散,而这一般需要 800 nm 厚的氮化硅膜。正常色散也可以产生光频梳,但也需要 600 nm 厚的氮化硅膜,

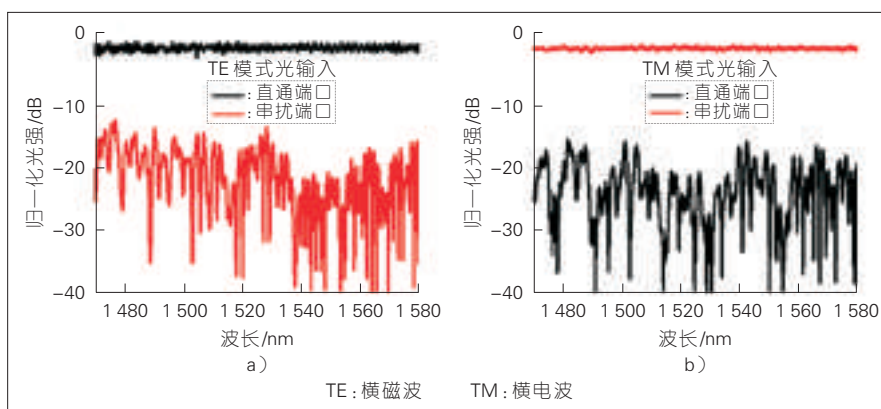
在工艺上很难实现,因为一般 CMOS 代工厂只能生长 300 nm 厚的氮化硅薄膜,因此传统的芯片上的光频梳器件不能在 CMOS 代工厂制备,也不具备量产化的可能。我们在世界上首创了基于模式耦合的色散调控,Q 值高达 1.5×10^6 ,在 300 nm 厚的氮化硅薄膜上产生了光频梳^[10],并观测到了类似于光学孤立子的锁模短脉冲。我们采用了双跑道型的氮化硅波导结构,利用模式之间的耦合实现了反常色散,这样就避免了厚膜氮化硅工艺过程中的应力和可靠性问题。通过这种原理创新能够大幅度地改进了工艺难度,提供了片上波分复用光源的一系列新的机理,并且具备了在 CMOS 代工厂量产的可行性。相应的结构示意图以及相关的实验结果如图 6 所示。

1.6 3D 互连新器件

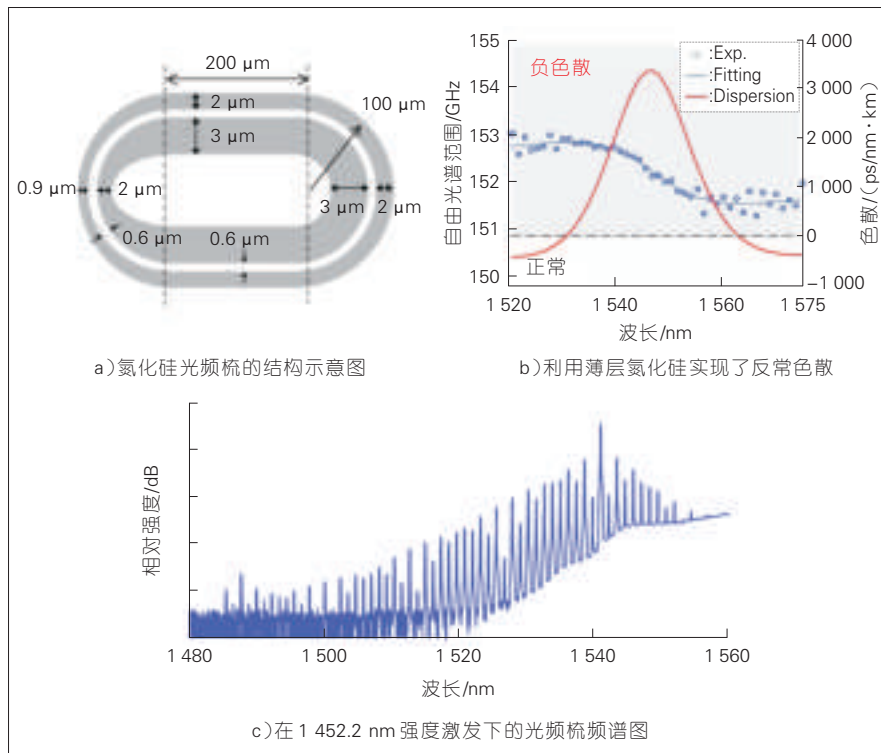
根据业内预测,片上服务器技术将在 2020 年之前成为现实。片上服务器的每个组件将逐渐小型化,并提供比现有的性能更高的性能。电子



▲ 图 4 级联双层锥形模式转换器与反向锥形耦合器的偏振旋转分束器结构示意图



▲ 图 5 级联双层锥形模式转换器与反向锥形耦合器的偏振旋转分束器测试结果



▲图6 基于氮化硅的高Q值光频梳

系统组件的趋势是通过利用三维封装来缩小其占用空间。一个新型的方案是双层结构3D光互连方案,该方案采用IC+Photonics的设计,分为处理器层和SOI光互连层,两层之间通过硅通孔(TSV)互连。SOI光互连层可以进一步分为2层,分别为有源器件层和无源器件层,这2层的集成度很高,传统的TSV由于尺寸过大不能用作这2层间互连。所以,我们需要一种新型的小尺寸结构,形成光链路来连接有源器件层、层间部分和无源器件层,我们提出了一种高度集成的硅柱子纳米天线阵列,具体如图7所示。

面内入射光进入圆柱阵列后,均等地耦合进入两排导波圆柱链中传输,并且在缺陷位置产生垂直芯片的远场光辐射。天线阵列仅有亚波长尺度,产生的垂直光束直径仅为几微米,具有高发射效率、良好的光束垂直度和尺寸可控性,通过优化设计垂直耦合的总效率^[11]理论上可高达92%,为3D光学互连提供了一个全

新的技术路线。

2 高集成度光子集成芯片研究

2.1 微波光子的高频超宽带微波任意波形产生

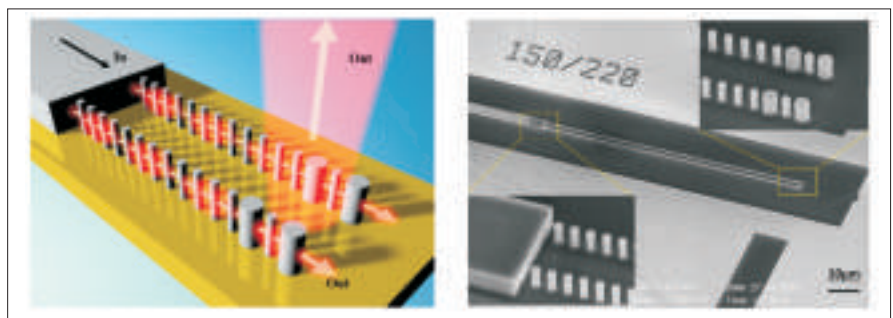
为解决传统利用分立器件搭建的微波光子系统体积大、功耗高,以及受外界环境影响大等缺点,我们提出了利用硅基集成光子学技术实现单片集成微波任意波形发生功能的核心思想。与传统方案相比,采用硅基集成光子学方案实现片上集成微

波光子系统具有体积小、重量轻、携带使用方便等诸多优点。通过对通道化技术进行研究,在片上利用多通道微环谐振结构需要从飞秒激光脉冲中提取频率分量,对每个频率分量进行独立的幅度和相位调节,再利用微环阵列构建可调延迟线,实现频域时域映射,最后经高速探测器完成光电转换产生超宽带微波任意波形。片上集成高速电光调制器利用电光调制实现波形高速重构^[12]。在实验上,我们利用CMOS工艺在硅衬底上的设计实现了高速电光调制器与八通道微环谐振滤波结构集成。该芯片最终演示了40 GHz(图8 a)、b)和30 GHz(图8 e)、f)的射频(RF)脉冲以及30~50 GHz的变频信号(图8 h)、g);通过高速光电调制器,实现了快速幅度调制的40 GHz RF脉冲(图8 c)、d)。

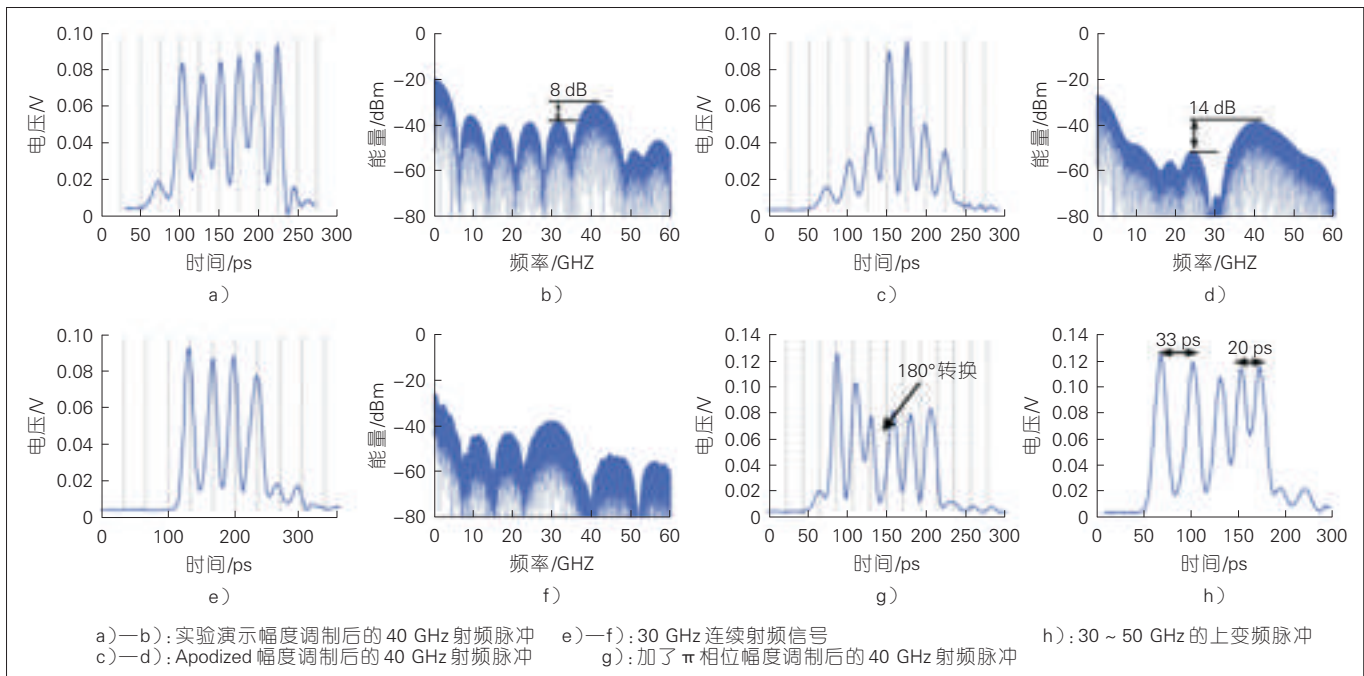
我们利用硅光子集成技术研究了微波光子的高频超宽带微波任意波形产生,方案原理如图9所示。本工作利用多通道微环谐振结构从飞秒激光脉冲中提取频率分量,通过集成的可调延迟线对每个频率分量在片上进行独立的幅度和相位调节,实现频域时域映射,经高速探测器完成光电转换,产生超宽带微波任意波形;进一步通过与高速电光调制器的片上集成,利用电光调制实现了波形高速重构。

2.2 八通道偏振不敏感波分复用接收芯片设计

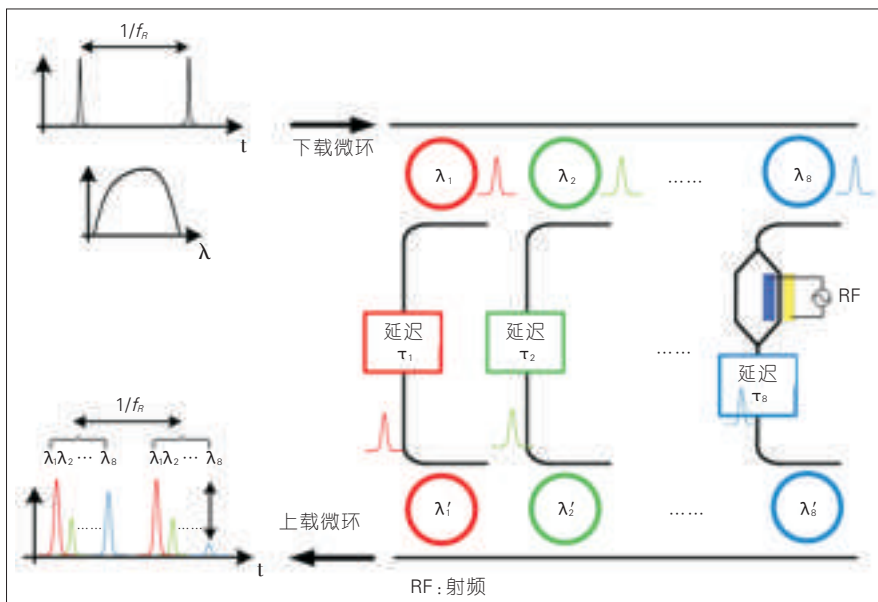
集成系统中光学器件普遍具有



▲图7 实现垂直光发射的硅圆柱阵列



▲ 图 8 高速电光调制器与八通道微环谐振滤波结构集成芯片结果演示



▲ 图 9 硅基片上任意波形发生器示意图

偏振敏感问题,为解决该问题,可以在系统中设计偏振不敏感波导。该波导往往需要特定的结构,例如:方形波导,但此方案需要精确控制尺寸,在工艺上很难实现。另外一种解决方案是针对每种器件专门设计偏振不敏感的结构,但是在偏振不敏感优化尺寸下的器件往往不能达到性

能最佳,且器件往往需要特殊的器件结构及复杂的工艺。为解决此问题,我们选择偏振旋转分束器。将偏振旋转分束器与硅基阵列波导光栅和锗探测器集成,设计了一个八通道偏振不敏感波分复用接收芯片^[13]。相应的芯片设计以及具体的显微镜图片见图 10。

该系统的工作原理如下:当任意偏振态的光入射到芯片中时,任意偏振态的光被分成 TE 和 TM 2 种正交模式。其中 TE 模式的光不经过任何变化,在 PSR 的下端口输出进入到下方的 AWG 中, TM 模式入射的光转换为 TE 模式,在 PSR 的上端口输出进入到上方的阵列波导光栅中,最后,相同波长的两种模式的光信号从相反方向进入到相同的锗光电探测器中。

通过图 11 测试结果可以看出:系统具有偏振不敏感特性,偏振相关损耗低于 1.21 dB。同时系统的串扰低于 -15 dB,并且系统具有高速特性,可以在 10 Gbit/s 的条件下得到清晰的眼图(见图 12)。这一优化的偏振控制器件和分集机制能够同样应用于更高速率的 WDM 系统,在 5G 中实现广泛应用。

3 结束语

本文中,我们围绕基于 CMOS 平台的硅光子关键器件与工艺进行了系列的研究,给出了一些无源器件和集成芯片的研究成果。这些研究结果距离实用化还有相当的距离,但是

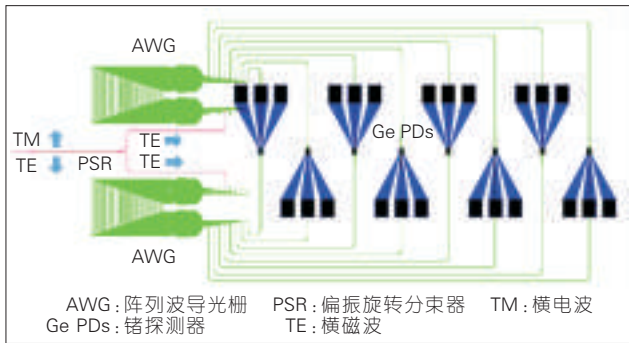


图 10 八通道偏振不敏感波分复用接收芯片设计图

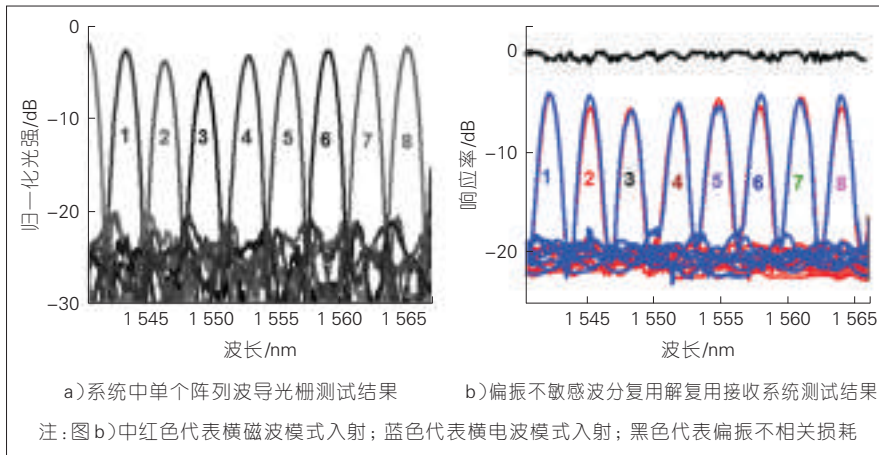


图 11 测试结果

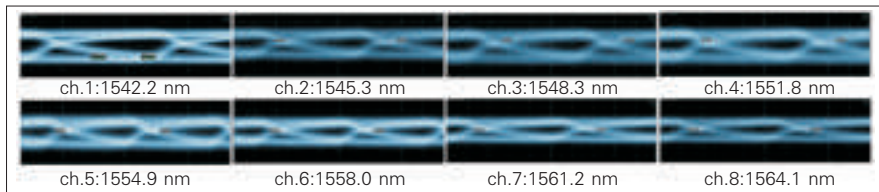


图 12 10 Gbit/s 条件下偏振不敏感波分复用解复用接收系统眼图

采用 CMOS 工艺实现硅光子功能集成芯片已经成为业界共识。未来我们会将硅光子器件的研究推向实用化，并将基于 CMOS 平台追逐更前沿的超大规模光子集成和光电集成等方向，充分发挥出硅光子技术的价值。

参考文献

[1] DUMON P, BOGAERTS W, WIAUX V, et al. Low-Loss SOI Photonic Wires and Ring Resonators Fabricated With Deep UV Lithography [J]. IEEE Photonics Technology Letter, 2004(16): 1328-1330. DOI: 10.1109/LPT.2004.826025
 [2] SELVARAJA S K, BPGAERTS W, THOURHOUT Van D. Loss Reductions in Silicon Nanophotonic Waveguide Micro-Bends through Etch Profile Improvement [J]. Optics Communication, 2011(284):2141-

2144. DOI: 10.1016/j.optcom.2010.12.086
 [3] LEE K K, LIM D R, KIMERLING L C. Fabrication of Ultralow-Loss Si/SiO₂ Waveguides by Roughness Reduction [J]. Optics Letters, 2001(26):1888-1890. DOI: 10.1364/OL.26.001888
 [4] CHAO Q, ZHEN S, LI L, et al. Poly-Silicon Grating Couplers for Efficient Coupling with Optical Fiber [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2012(24):1614-1617. DOI: 10.1109/LPT.2012.2210703
 [5] CHAO Q, ZHEN S, LI L, et al. High Efficiency Grating Couplers based on Shared Process with CMOS MOSFETs [J]. Chinese Physics B, 2013(22): 024212. DOI: 10.1088/1674-1056/22/2/024212
 [6] LI J, QIU C, CHEN X, et al. CMOS Compatible Thermal Tunable Planar Silicon Etched Diffraction Gratings [C]//International Conference on Optoelectronics and Microelectronics Technology and Application. China: International Society for Optics and Photonics, 2017, 10244: 1024429. DOI:

10.1117/12.2266336

[7] BARWICZ T, WATTS M R, POPOVICMILOS A, et al. Polarization-Transparent Microphotonic Devices in the Strong Confinement Limit [J]. Nat Photon, 2007(1): 57-60. DOI: 10.1038/nphoton.2006.41
 [8] CHEN X, QIU C, SHENG Z, et al. Design of an Ultra-Broadband and Fabrication-Tolerant Silicon Polarization Rotator Splitter with SiO₂ Top Cladding [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(8): 081301. DOI: 10.3788/COL201614.081301
 [9] RISEN N, LOVE J D. Tapered Velocity Mode-Selective Couplers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(13): 2163-2169. DOI: 10.1109/JLT.2013.2264827
 [10] KIM S, HAN K, WANG C, et al. Dispersion Engineering and Frequency Comb Generation in Thin Silicon Nitride Concentric Microresonators [J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 372. DOI: 10.1038/s41467-017-00491-x
 [11] HUANG H, LI H, LI W, et al. High-Efficiency Vertical Light Emission through a Compact Silicon Nano Antenna Array [J]. ACS Photonics, 2016, 3 (3):324-328. DOI: 10.1021/acsp Photonics.5b00641
 [12] WANG J, SHEN H, FAN L, et al. Reconfigurable Radio-Frequency Arbitrary Waveforms Synthesized in a Silicon Photonic Chip [J]. Nature Communications, 2015, 6: 5957. DOI: 10.1038/ncomms6957
 [13] ZHAO Y X, CHAO Q, WU A M. Low-Loss and Broadband Polarization Splitter and Rotator and Its Application in DWDM Receiver [C]//IEEE Photonics Conference 2017. USA:IEEE, 2017. DOI: 10.1109/IPCon.2017.8116139

作者简介



赵瑛璇，中国科学院上海微系统与信息技术研究所在读博士生；研究方向包括硅基偏振旋转分束器、硅基MZI干涉器、硅基调制器、硅基集成系统等设计及测试。



武爱民，中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员；研究方向包括利用新原理和新材料研制高性能的硅光子器件，实现高速通信和激光雷达等的光子集成芯片；2017年以第2完成人获得上海市自然科学一等奖；发表论文60余篇。



甘甫皖，中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员；研究方向为硅光子技术和集成芯片研究，探索其在光互连、光通信领域的产业应用；2017年以第1完成人获得上海市自然科学一等奖；发表论文10余篇。

半导体前置光放大器的设计和制作要点

Essentials in Design and Fabrication of Semiconductor Optical Pre-Amplifier

李洵/LI Xun^{1,2}

左成亮/ZUO Chengliang³

董智星/DONG Zhixing³

(1. 山东大学, 山东 济南 250100;

2. 麦克马斯特大学, 加拿大 汉密尔顿

L8R4K1;

3. 华中科技大学武汉光电国家实验室武汉

光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074)

(1. Shandong University, Jinan 250100,

China;

2. McMaster University, Hamilton L8R4K1,

Canada;

3. Wuhan National Laboratory for

Optoelectronics of Huazhong University of

Science and Technology, Wuhan 430074,

China)

半导体光放大器(SOA)的主要作用是对光信号功率进行直接线性放大,利用其增益饱和所产生的稳态及动态非线性效应,SOA还可被用于实现某些非线性功能,例如:在光转发器中把某一波长上的光信号直接复制到另一波长上,在基于波分复用无源光网络的光纤接入网中、在用户光网络单元中对光信号进行擦除或功率均衡,或在全光网络中对不同波长光信号进行直接转换或逻辑处理,或对光信号的消光比进行直接提升等等。

在线性放大应用中,对SOA的具体要求包括高增益、高饱和功率(即能确保线性放大的最高输出功率)、低噪声指数(输入信号信噪比与输出信号信噪比之比)、低增益偏振相关度,及宽增益谱等。这类应用具体又可区分为发射端光源后置放大,即

收稿日期: 2018-07-10
网络出版日期: 2018-08-06

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 04-0015-06

摘要: 介绍了用于接收端探测器前置放大的半导体光放大器的核心设计要点及其与普通半导体激光器在实际制作中的几个不同点。半导体前置光放大器的设计核心是如何抑制其中的自发辐射并被伴随放大的噪声,对于边入射型的器件还要考虑其增益偏振相关性的消除。半导体光放大器一般具有少阱和低光场限制因子的长增益区结构,在这点上它与高速直调半导体激光器有着最大的区别。

关键词: 半导体光放大器;接收端前置放大;ASE噪声;增益偏振相关度;增益-带宽积;饱和功率

Abstract: This paper has its focus on the essential design consideration of semiconductor optical amplifiers for optical signal pre-amplification in optical receivers. It also briefs some differences from semiconductor laser diodes in their fabrications. In considering the design of pre-amplifiers, the amplified spontaneous emission (ASE) noise needs to be suppressed and their gain polarization dependence (in edge incidence device only) needs to be eliminated. Semiconductor optical amplifiers also have longer active regions with fewer quantum wells and lower optical confinement factors, which makes them different from directly modulated semiconductor laser diodes.

Keywords: semiconductor optical amplifier; receiver pre-amplifier; ASE noise; gain polarization correlation; gain bandwidth product; saturation power

使用SOA对激光器输出的光信号进行放大以提高其入纤功率;在线放大,即使用SOA对光纤中在线传输的光波信号进行直接放大;接收端探测器前置放大,即使用SOA对到达接收端的光波信号先进行放大再通过探测器进行光电转换。

发射端光源后置放大主要需要高增益和高饱和功率,当用于可调谐激光器或多波长激光器阵列合波后的后置放大时,还要求宽增益谱。由于刚由激光器产生的光波信号具有很高的信噪比,激光器的输出光又具有确定的偏振方向,所以对用于后置放大的放大器噪声指数及增益偏振相关度要求不高。

在线放大对放大器的特性要求

最全面也最高,除需要高增益和高饱和功率之外,还需要考虑如何降低放大器自发辐射噪声(ASE)和如何实现增益的低偏振相关度。事实上,前述所有对于线性放大的一般要求在在线放大应用中都需要达到。

接收端探测器前置放大需要在一定的增益下具有极低的噪声指数以及低增益偏振相关度,由于接收端的人射功率很低,所以对饱和功率要求不高。

由于某些指标对(例如:宽增益谱与低噪声指数)与SOA设计参数之间的依赖关系是互相矛盾的。所以,一般SOA的设计制作只能针对特定的具体需求在不同特性指标上有所突出和舍弃。文章中,我们将主要分

析与讨论用于接收端探测器前置放大的SOA设计与制作要点^[1-2]。

1 接收端前置放大器的设计要点

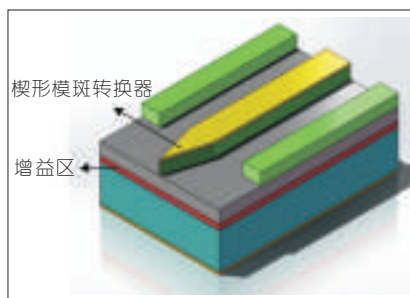
普通的PIN光电二极管光电探测器只能完成光电转换而没有增益,所以灵敏度有限;而雪崩光电二极管(APD)实质上是一个PIN(光电转换)加电放大。尽管其灵敏度较高,但因电放大过程受载流子渡越时间限制,带宽一般难以达到50 GHz以上。如果我们把上述过程转变为光放大加PIN(光电转换),则在保持高灵敏度的同时还可以解决带宽受限问题,因SOA的基带宽度可远远大于50 GHz。理论上行波型SOA中的入射光波仅单程穿越增益区,所以对信号的基带带宽没有限制。此时,穿越增益区波导所花费的时间仅引起延迟,其效果与在普通波导例如光纤中传输是一样的,只是光信号的幅度被放大而已。谐振型SOA的入射光会在增益区中往复折返传输,所以其信号基带宽度受到光波信号穿越增益区所需要的时间限制,但即使增益区的长度达到1 mm,光波信号的穿越时间也不到10 ps,所以一般SOA的基带宽度达到100 GHz是容易做到的。这样采用SOA做前置放大加PIN的方案在增益-带宽积上是可以大大优于APD的。但是相比于APD,SOA的ASE噪声会对灵敏度带来严重影响,所以可用于接收端前置放大的SOA需要解决的首要问题是如何有效地抑制其ASE噪声。

其次,对于面入射型的PIN,SOA与之集成的最简便方式是也采用垂直腔面入射式的结构。这种方式结构简单,又能通过一次外延生长制备,还具有便于二维阵列集成等优点。它的一个显著优点是由于其波导的圆对称性,只要使得材料增益支持平面内的偏振,则整个器件的增益就不存在偏振相关性。但这种器件的一个突出缺点是其增益区受外延

层厚度限制而无法做长,于是整个SOA的单程增益过低。为了等效延展增益区长度,必须设计反射Bragg光栅形成谐振光腔,以使入射光波信号在被置于谐振腔内的增益区往复折返。但这样做的代价是损失了增益谱带宽,从而导致面入射型的SOA-PIN的增益带宽积一般只能做到在100 dB-nm左右。为了突破对增益-带宽的这一限制,有必要采用边入射型的(即传统的)SOA结构,它的增益区长度可以不受限制,但一个必须要解决的问题就是要消除器件增益的偏振相关性^[3-5]。

1.1 对ASE噪声的抑制

前文已经说明为了尽量降低对放大后的光波信号的信噪比劣化,在SOA设计中首先要考虑的是如何使输入耦合损耗降至最低,以保证入射信号功率不受损失。减小耦合损耗的一般方法是在波导的输入(或同时在输出)端口设计一个集成的模斑变换器,从而扩大波导在端口的模斑,使其与光纤的模斑尽量匹配。需要注意的是:这个模斑变换器需要有注入也同时提供增益,或者是透明的,而不能对入射信号光波有吸收,否则同样劣化信噪比,失去了模斑变换的意义。一个典型的带有楔形模斑变换器设计的SOA如图1所示。尽管这种变换器设计和制作简单,但只对展宽截面光场的横向分布比较有效,对更为严重的也是耦合损耗主要来源的纵向分布展宽作用微小。为了解决这一问题,可以在增益区之下引

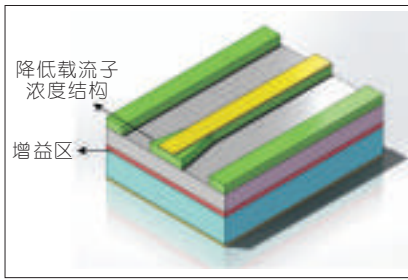


▲ 图1 输入端口集成有楔形模斑变换器的半导体光放大器

入第二波导,并利用楔形区通过逐渐减弱脊条对光场的限制使得光场逐渐下移,直至其部分耦合至第二波导,这样整个纵向光场分布将被增益波导和下埋第二波导的共同作用所展宽,从而有效地解决耦合问题。这种变换器的设计和制作我们正在进行之中,更详细的讨论已超出了本文的范围。

降低放大器的ASE噪声需要降低增益区内的载流子浓度,由于随机的自发辐射正比于高能级上(即导带内)的电子占有率,所以高(反转)载流子浓度必然导致高ASE噪声。降低载流子浓度自然是与追求高增益及高饱和功率相矛盾的,但考虑到ASE噪声的贡献主要来自于临近输入端口的放大器前段,所以可以考虑采用沿波导的非均匀增益区结构或非均匀注入在维持增益的同时抑制ASE噪声。由于垂直方向的结构是依靠外延技术逐层生长的,尽管有选择区域外延生长技术(SAG)可以在局部连续或突变性地改变生长平面内的薄层厚度,但在垂直方向上引入容易控制的层厚渐变结构仍然是很不方便的。一般方便采用的只有在水平方向上引入喇叭形结构以增加入射端口的波导宽度,这样在同样的注入条件下由于入射端口附近的增益区体积增大^[6],载流子浓度必然降低。特别需要我們注意的是:为保持注入电流的一致,电极条形必须仍然是均匀的,否则由于同一电极上的电压一致,电极的宽窄只会影响到注入电流而不会改变电极下的电流密度。以脊波导为例,这样的结构示意图如图2。

降低ASE噪声的再一个可能途径是使自发辐射的光场尽量不被耦合到波导之中,这就要求波导具有尽可能低的数值孔径。由于低数值孔径与低光场限制因子的波导设计要求实质上是一致的,所以无须再采取附加措施。只是低数值孔径的波导不利于入射光场的耦合,所以在入射



▲ 图2 输入端口集成有降低载流子浓度结构的半导体光放大器

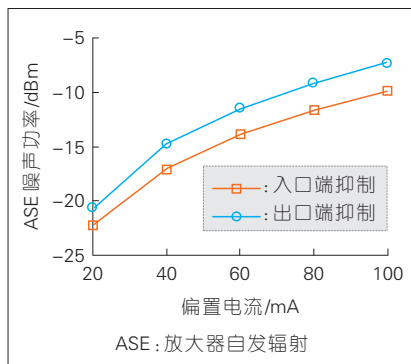
端口尤其需要采取上述提到的特别措施。由于在入射端口附近特别需要抑制自发辐射,而模斑变换器的设计必然会增大波导数值孔径,从而使自发辐射光场更容易地被耦合到波导之中。这样看来:理想的集成模斑变换器设计最好是采用无需注入的对入射光波长透明的宽带隙半导体的材料,这样就可以避免在此段具有较高数值孔径的波导内产生自发辐射^[7]。

为了确认上述对噪声抑制的主要分析结果,这里再进一步展示一些仿真计算的对比结果。在输入端口附近和在输出端口附近抑制自发辐射的不同效果对比如图3所示。

在同一注入但不同增益区体积下(从而载流子浓度不同)SOA的ASE噪声功率如图4所示。

在不同注入但相同增益区体积下(从而载流子浓度也不同)SOA的ASE噪声功率如图5所示。

由于载流子浓度相同但光场限制因子不同(即数值孔径不同),从而



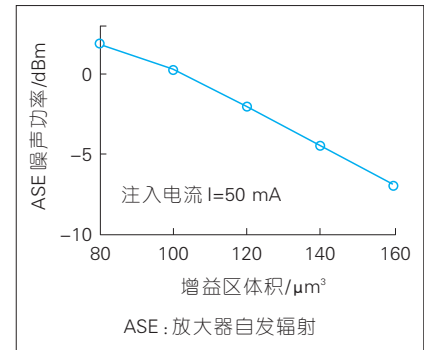
▲ 图3 在输入端口附近和在输出端口附近抑制自发辐射的差异

导致波导捕捉自发辐射光场的能力有所不同,SOA的ASE噪声功率如图6所示。

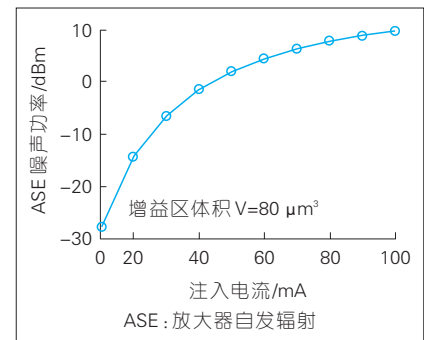
显然,所有的这些仿真计算的结果与我们之前的分析是完全一致的。

尽管提高增益和饱和功率及抑制噪声对波导的设计要求是一致的,但其对增益区内的载流子浓度的要求却是相反的,这意味着提高增益和饱和功率及抑制噪声对于电流注入的要求是相矛盾的。由于抑制ASE噪声需要在输入端口附近施行,而由于沿途放大的作用,靠近输出端口的增益区波导内光功率显然更高。这样在输出端口附近的增益更容易饱和,于是提高饱和功率需要在输出端口附近施行。很显然,如果我们使得注入电流沿增益区波导长度方向呈非均匀分布,注入电流密度在输入端口处最低,而后沿波导往输出端口方向逐渐增高,这样就可以使增益区内的载流子浓度在输入端口附近较低,而在输出端口附近较高,于是可以同时满足抑制噪声和提高饱和功率的要求。这样设计的器件与普通均匀注入器件特性的对比如图7所示,采用非均匀注入后对ASE噪声的抑制以及对饱和功率的提高作用是十分明显的^[8]。

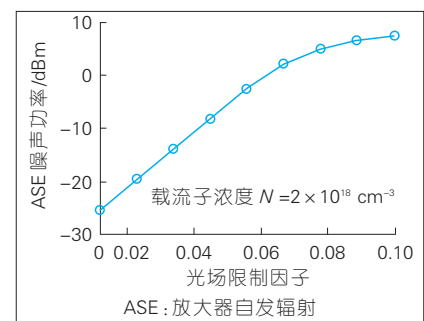
利用噪声的非相干性,还可以考虑在频域上或空域上滤除ASE噪声。例如:可以考虑在放大器后集成为一个光频段的窄带通滤波器,利用滤波器的选频特性可以滤除通带外



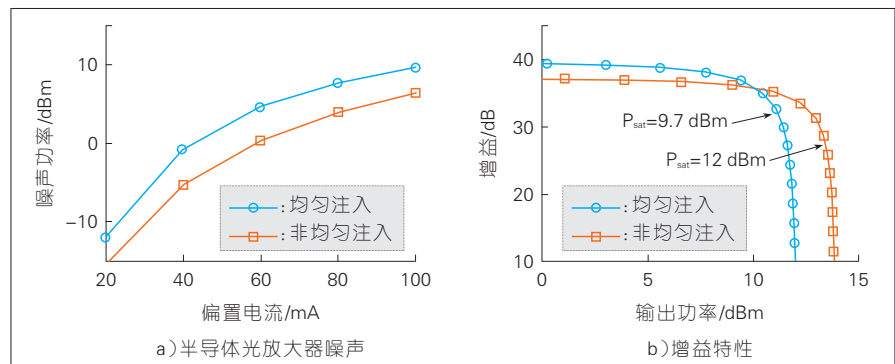
▲ 图4 相同注入不同增益区体积下半导体光放大器的ASE噪声功率



▲ 图5 相同增益区体积不同注入下半导体光放大器的ASE噪声功率



▲ 图6 相同载流子浓度不同光场限制因子下半导体光放大器的ASE噪声功率



▲ 图7 非均匀注入(电流密度由输入往输出端口方向逐渐增加)与均匀注入的半导体光放大器噪声与增益特性对比

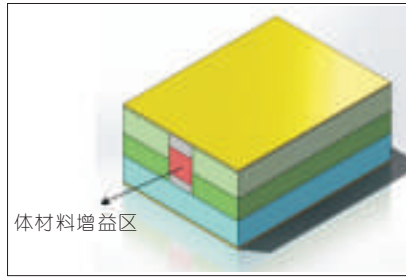
的 ASE 噪声,而通带内的光波信号是不受影响的。实现这种方案的一个方便途径是在波导的输出端面蒸镀具有带通特性的膜系,使得通带外的 ASE 噪声被阻挡而无法输出。空域上噪声滤除的方式可以采用干涉的方法,即利用光波信号的相干性设计基于波导的干涉装置(例如:波导光栅),受干涉的影响,光波信号被集中在输出端口,而不受干涉影响的 ASE 噪声却无法集中在空间的某个特别之处,这样就可以在空间上适度分离光波信号和噪声,使得 ASE 噪声被部分滤除。

1.2 增益偏振相关性的消除

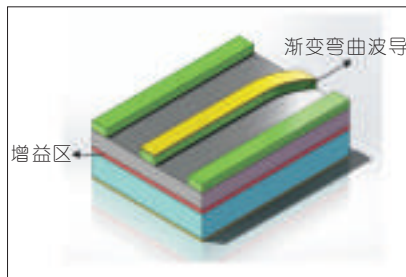
针对如何降低 SOA 的增益偏振相关度或彻底消除其增益偏振相关性已有了大量的工作报告,其方案主要有以下 3 类:

(1) 消除材料增益的偏振相关性并采用对称波导设计,例如:使用体材料增益区结合基本呈正方形截面的掩埋结构,如图 8 所示。

(2) 使材料增益与波导非对称各自引起的偏振相关性相消,例如:脊波导结构与对横磁波 (TE) 偏振一般有着更大的光场限制因子,所以需要材料增益区对增益区材料施以一定的张应变。由于张应变材料对于横电波 (TM) 偏振的增益贡献更大,所以一旦做到对 TE 和 TM 2 个偏振的模式增益(即光场限制因子与材料增益之积)一致,则因 $e^{\Gamma_{TE}gL} = e^{\Gamma_{TM}gL}$, 所以整个器件增益的偏振相关性即可被消除。值得注意的是:完美的补偿实际上是很难实现的,所以采用这种方案一般需要结合在平面内渐变弯曲波导的方法对不同偏振进行二次补偿,如图 9 所示。这种补偿的原理为:平面内弯曲波导会使得水平偏振光产生辐射泄漏,而垂直偏振光所受到的影响则很小。考虑到自由空间中的平面波在波的传播方向上不会有电磁偏振这一基本效应,我们就不难理解产生这一效应的原因。事实上,一旦波导在



▲ 图 8 具有正方形体材料增益区的掩埋异质结半导体光放大器



▲ 图 9 具有渐变弯曲波导用以调整增益偏振相关度的半导体光放大器

平面内产生弯曲,则导波的传输必然开始偏向水平偏振的方向,但是偏振方向不可能与传播方向一致(尽管这里波导中的导波不是自由空间平面波,这一结论还是近似成立的),所以水平偏振的导波必然会随着波导弯曲程度的加大而逐渐截止传播,并转化为辐射波泄漏。垂直偏振的导波其偏振方向始终是与波导方向垂直的,所以受波导弯曲的影响相对比较小。

(3) 采用集总补偿,即使入射光波先直接经历一次放大,还需再使其偏振态旋转 90° (或增益波导旋转 90°) 后再经历一次相同的放大。这样即使入射光的偏振与水平方向有任意不确定的夹角 θ ,其所经历的增益为:

$$\begin{aligned} & \cos^2\theta(e^{\Gamma_{TE}gL}) + \sin^2\theta(e^{\Gamma_{TM}gL}) + \\ & \sin^2\theta(e^{\Gamma_{TE}gL}) + \cos^2\theta(e^{\Gamma_{TM}gL}) = \\ & (e^{\Gamma_{TE}gL}) + (e^{\Gamma_{TM}gL}) \end{aligned} \quad (1)$$

该增益与入射角无关。基于同样的想法,我们还可以设计一个波导式线偏-圆偏转换器,圆偏光被均匀材料反射后再经历同一结构反向传

输后会被扭转 90° 。利用这一特性容易得到反射式的增益偏振无关放大器。因为入射光在经过同一段增益区的往返程上偏振态正好相差 90° ,所以正好同样满足上述条件。这一器件的结构示意如图 10。类似的方法还有把增益区波导同时设计成一个针对任意入射角的 180° 旋偏器,如图 11 所示,在这样的器件中入射光所经历的增益是:

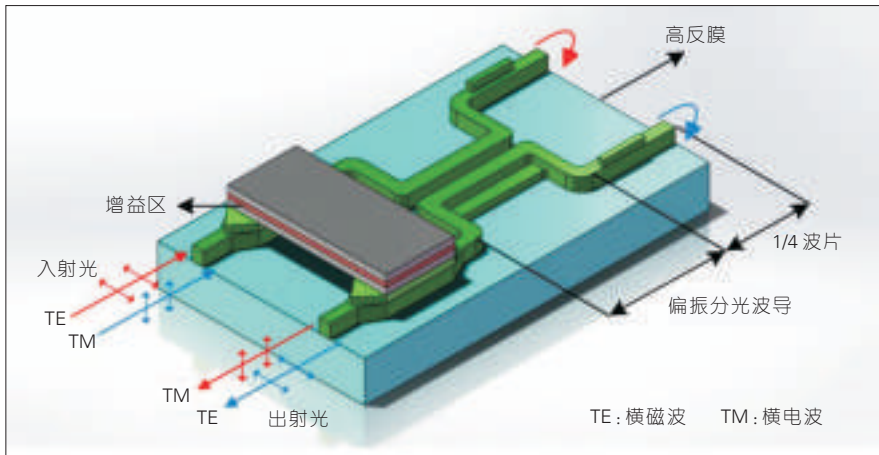
$$\int_0^\pi [\cos^2\theta(e^{\Gamma_{TE}gL}) + \sin^2\theta(e^{\Gamma_{TM}gL})] d\theta = \pi[(e^{\Gamma_{TE}gL}) + (e^{\Gamma_{TM}gL})] \quad (2)$$

该增益仍然与入射角无关。

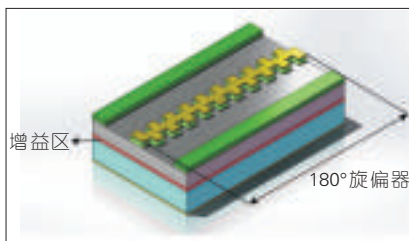
2 接收端前置放大器的基本制作工艺要点

前面的讨论集中在用于接收端前置放大时对 SOA 设计的一些特殊设计的考虑上;但这些特殊考虑是建立在通用 SOA 的基本设计和现行制作工艺基础之上的,不首先了解通用 SOA 的设计制作要点则任何特殊考虑都无从谈起。受篇幅限制,之后的讨论将假设读者已熟知普通半导体激光器的制作工艺。

对普通 SOA 的基本要求是高增益和高饱和功率,为达此目的,我们显然希望使 SOA 的增益区内积存有较高的载流子浓度。由于增益与载流子浓度成正比,所以高载流子浓度导致高增益,这一点直观上也很容易理解。由于放大饱和是增益区内载流子被耗尽所致,所以高饱和功率一样也要求增益区内保持有较高的载流子浓度。为了在给定的注入下保持高载流子浓度,最有效的方法显然是尽可能缩减增益区截面积。由于波导的条宽受光纤耦合及制作工艺限制难以进一步压缩,那么剩下的方法就只有缩减体材料增益区的厚度或量子阱增益区内量子阱的个数和每个阱的厚度。一般 SOA 的增益区都是采用单阱或双阱结构(双阱主要是为了防止太多的光波横向场分布



▲ 图10 增益与偏振无关的半导体光放大器 I



▲ 图11 增益与偏振无关的半导体光放大器 II

在增益区之外的P型掺杂层,因为对光波的非带间吸收主要来自于P型掺杂所造成的自由载流子吸收),在这点上SOA与半导体激光器(尤其是高速直调半导体激光器)有着显著的区别。

当增益区的载流子浓度已无法再提高时,还可以通过调整光波导的设计,即利用横向光场与载流子分别限制促使光波的横向场分布与增益区有着尽可能小的重叠,这样才能使得沿波导每个截面上的载流子尽可能不被入射光波光子耗尽,从而提升饱和功率。当然,这样做的结果会导致单位长度上的增益减小。为了使需求的增益得以满足,一般可以再延长增益区的长度。事实上,决定放大器增益的基本量是 $e^{\Gamma L}$,所以当材料增益 g 一定时,为增加饱和功率而需要减小的光场限制因子 Γ 可以靠延长增益区长度 L 补偿,从而确保放大器增益不变。在这点上SOA与半导体激光器也有着显著的区别,而且小光

场因子的要求也是与直觉相违背的。

除了在增益区结构上有着上述的基本不同点之外,SOA的制作工艺与一般的半导体激光器没有太多区别,同样工作波长的波段也采用同一体系的材料。由于更多地采用了薄增益层设计,甚至有可能需要在增益区中再插入生长薄到只有1~2个单原子层的所谓 δ 势垒层,以便通过单独调控子价带(重空穴带)来平衡增益区的TE和TM材料增益,所以对于SOA结构的外延生长使用分子束外延(MBE)设备与使用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)设备一样流行。在MBE中还可以使用Be替代 Zn 作为受主杂质进行P区掺杂,这样就可以避免因 Zn 容易扩散而产生PN结移位;而在MOCVD中由于其毒性问题一般不能使用Be源。特别值得注意的是:由于光放大器的增益区需要采用低光场限制因子设计,光场在增益区外的延伸更为显著,从而与P型掺杂区域的重叠也更为严重。由于光场在增益区外呈指数式衰减,我们于是将P型掺杂区的浓度设计成由增益区向外呈指数式上升,这样可以保证在一定的P型掺杂浓度下光场与P型掺杂区的重叠程度最小,PN结也不至于偏位。

除外延之外,半导体光放大器的制作工艺还主要涉及到氧化物沉积(通过PECVD或ALD等设备进行)、

普通光刻、干法刻蚀(通过ICP-RIE或CAIBE等设备进行)或湿法刻蚀、金属沉积(通过溅射或电子束蒸发),以及端面镀膜(通过电子束蒸发)等,但这些工艺在一般意义上与制作半导体激光器没有什么不同,所以这里不再进行深入讨论。只是需要注意光放大器对与端面镀膜,尤其是增透膜的要求远远高于激光器。为获取宽带低反射的增透膜,一般除了需要采用多层膜系设计外,对电子束蒸镀过程的精确控制分外重要。一般而言,采用带有电子回旋共振(ECR)系统的设备比普通设备更有利,采用晶振(宽带)和光学干涉(单波长高精度)双重监测控制比单一监测控制更有利。

优良器件的获得离不开理论设计与制作工艺的密切配合,光放大器中端面反射问题的消除恰是一个典型的例证。在镀膜工艺的精度达到极限之后,进一步降低端面反射的要点在于如何对端口(主要是输出口)进行散斑设计,使得在端口处的截面光场分布尽量均匀,即使得出射光波尽量接近TEM波(或局域化的平面波,注意介质波导中真正的TEM波是不可能存在的)。由于TEM波的传播方向单一并垂直于截面,理论上容易证明此时的膜系设计可以使得反射最低。很明显,由于此时的反射方向也单一,所以只要稍许倾斜输出端口的波导,即可使得仅有的反射也难以重新耦合进入波导造成真正意义上的反射。这种散斑设计总体上的要求与扩束模斑增进与光纤的耦合以及低光场限制因子波导设计都是一致的,只是要求截面上的束(模)斑内部场分布更加均匀。

在SOA的实际应用中还经常要求有较宽的增益谱,所以需要采取措施尽可能地展宽材料增益谱。工艺上的措施包括加大量子阱的应变变量,或采用厚度略有不同的多个阱构造增益区,这样将造成材料增益峰的直接展宽,或各个阱增益峰的错位,在

2个措施共用的情况下效果更为显著。例如:使用1.5%的压应变和3个厚度分别为4 nm、5 nm和6 nm的量子阱增益区结构可以获得100 nm的材料增益峰半高全宽(FWHM),而通过压应变为1%及厚度为5 nm的单阱常规增益区设计只能获得60 nm的材料增益峰半高全宽。

3 结束语

作为一个重要的功能性器件,光放大器既可在其线性区被用于光信号的直接线性放大,又可在其饱和区被用于实现某些特定的非线性功能。半导体光放大器自然继承了半导体器件的所有优点,其发展前景是不言而喻的。但仅就接收端探测器前置放大要求而言,半导体光放大器的噪声指数仍有下降的空间,其增益-带宽积也有上升的空间。另一个需要重要考虑点是其增益的偏振相关度,面入射型器件没有增益的偏振相关性问题,但是增益-带宽积受限(100 dB-nm)。边入射型器件的增益-带宽积理论上可以拓展1 000倍(3 000 dB-nm),但其增益的偏振相关性需要靠特殊的设计措施消除。在制作上半导体光放大器与半导体激光器的主要区别在于前者需要有

少阱及低光场限制因子的长增益区,而后者正相反。

参考文献

- [1] PARK J, LI X, HUANG W P. Comparative Study of Mixed Frequency-Time-Domain Models of Semiconductor Laser Optical Amplifiers[J]. IEE Proceedings - Optoelectronics, 2005, 152(3):151-159. DOI: 10.1049/ip-opt:20045034
- [2] BOUCHER Y, SHARAIHA A. Spectral Properties of Amplified Spontaneous Emission in Semiconductor Optical Amplifiers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(6):708-720. DOI: 10.1109/3.845728
- [3] XIA Y, YU Y, WANG K, et al. A Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifier Monolithically Integrated with the Photodetector[C]//Asia Communications and Photonics Conference. China: OSA, 2016
- [4] DUAN X, HUANG Y, SHANG Y, et al. High-Efficiency Dual-Absorption InGaAs/InP Photodetector Incorporating GaAs/AlGaAs Bragg Reflectors [J]. Optics Letters, 2014, 39(8):2447-2450. DOI: 10.1364/OL.39.002447
- [5] HUANG Z, LI C, LIANG D, et al. 25 Gbps Low-Voltage Waveguide Si-Ge Avalanche Photodiode[J]. Optic Letters, 2016, 3(8):793-798. DOI: 10.1364/OPTICA.3.000793
- [6] ZHU Z, LI X, XI Y. A Polarization Insensitive Semiconductor Optical Amplifier [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(17): 1831-1834. DOI: 10.1109/LPT.2016.2573291
- [7] WANG T, LI X, MU J W, et al. Electro-Optic Controllable Transverse Electric/Transverse Magnetic Polarization Converter based on the GaN/Al_{0.3}Ga_{0.7}N Superlattice Waveguide [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, B(35): 1888-1895

- [8] 朱仲书. 基于波导的抗反射结构及其在偏振无关半导体光放大器中的应用[D]. 华中科技大学, 2016

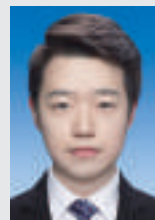
作者简介



李洵, 加拿大麦克马斯特大学电子与计算机工程系教授、山东大学兼职教授; 长期从事III-V族化合物半导体激光器及其他有源和无源集成光子和光电子器件的设计、仿真、研制、测试和封装等工作, 曾经为包括 Intel、NTT、前 Nortel 等在内的 20 多个全球著名企业提供过专业技术咨询服务, 作为 Apollo Photonics 的创始人之一, 早在 1998 年主持开发了一直沿用至今的半导体激光器商用仿真软件 ALDS; 多次获得各种奖励; 曾主持过多个重大项目; 发表论文 230 余篇, 报告 110 余篇, 获得授权美国专利 5 个, 授权中国专利 12 个。



左成亮, 华中科技大学武汉光电国家实验室武汉光电国家研究中心在读博士研究生; 主要研究方向为半导体光放大器的设计、仿真和测试, 以及其在波分复用无源光网络中的应用; 发表论文 3 篇。



董智星, 华中科技大学武汉光电国家实验室武汉光电国家研究中心在读硕士研究生; 主要研究方向为垂直腔半导体光放大器和 PIN 探测器的仿真和测试; 发表论文 1 篇。

面向5G通信的高速PAM4信号时钟与数据恢复技术

High-Speed PAM4 Clock and Data Recovery Techniques for 5G Communications

廖启文/LIAO Qiwen¹
Patrick Yin CHIANG²
祁楠/QI Nan¹

(1. 中国科学院半导体研究所, 北京, 100083;
2. 复旦大学, 上海 201203)
(1. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;
2. Fudan University, Shanghai 201203, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 04-0021-006

摘要: 针对5G通信中4级脉幅调制(PAM4)格式数据的高速传输,提出了可集成的数据与时钟恢复中若干关键技术,包括波特率采样、边沿选择、最优采样和阈值调节等。在单路50 Gbit/s以上速率可有效降低芯片硬件开销,降低系统功耗,降低误码率(BER),并可以提升芯片工作鲁棒性。上述技术在65 nm互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺下通过芯片设计及流片加工得到验证,测试结果表明:该芯片恢复时钟具备1.08 ps均方根值(RMS)的时域抖动;恢复数据最高速率在51 Gbit/s可实现 3.4×10^{-9} 的PAM4信号BER,以及低至6.27 pJ/bit的能耗效率。

关键词: 5G; PAM4; 时钟与数据恢复; CMOS

Abstract: Key techniques including baud-rate sampling, edge-selection, optimal sampling and threshold adjusting techniques are proposed for 4-level pulse amplitude modulation (PAM4) high-speed transmitting in 5G communications. Significant improvements are derived in terms of the hardware cost, system power consumption, bit-error rate (BER) and operation robustness above 50 Gbit/s. The proposed techniques are verified through chip design and tape-out fabrication in 65 nm complementary metal oxide semiconductor (CMOS) process. Measurement results show that the clock and data recovery (CDR) features 1.08 ps root mean square (RMS) clock jitter, 3.4×10^{-9} PAM4 data recovery BER and 6.27 pJ/bit power efficiency.

Keywords: 5G; PAM4; CDR; CMOS

1 光通信中的时钟与数据恢复

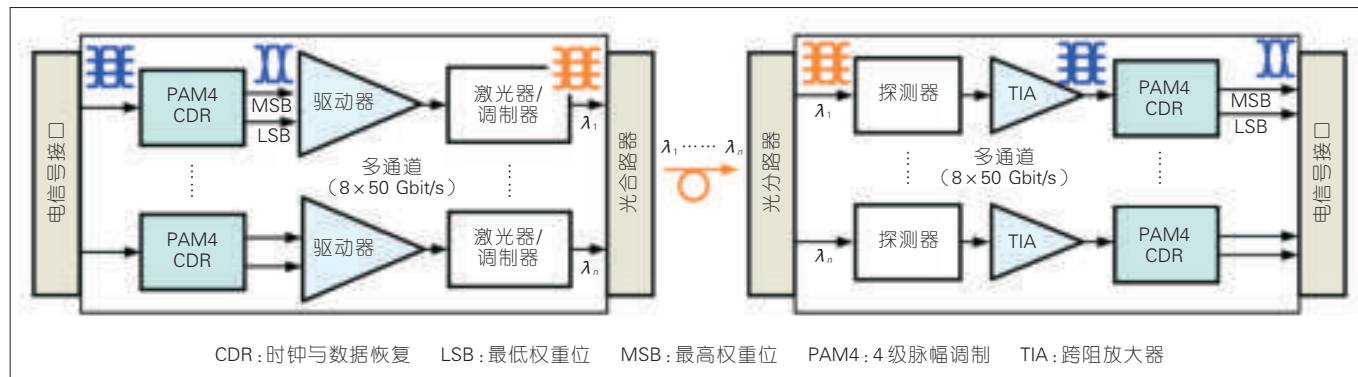
随着大数据和云计算技术的诞生,数据量呈现爆发式的增长,数据通信的带宽需求日益旺盛,而传统的电互连技术已经无法满足高速信息传输的需求。在此背景下,为了实现信息的更高速率的传输,利用光波作为传输介质,光信号作为信息载体的数据传输方案即光互连受到了越来越多的关注。光互连可以理解为光通信技术在短距离场景替代传统的电通信技术的一种实现形式,在具备光通信的所有技术优点的基础上,还具有更高性能的集成化、低功耗、低成本等特点,因此光互连能够实现超低功耗、较长距离、超高速、超高密度的数据通信,同时还具备无电磁干扰、短延时、长寿命、安全可靠等

特点。由此可见,光互连技术代表了未来中远距离数据通信技术的发展方向。光互连具有低功耗和高集成度的特点,其中的核心是集成光子技术和集成电路技术,主要包括:高速激光器芯片技术、高速调制器芯片技术、集成光波导技术、集成驱动芯片技术、光电探测芯片技术、集成数字信号处理技术等^[1-4]。

光互连系统是电光混合集成,由高速激光器和高速调制器将电信号加载到光波上,因此需要高速驱动芯片对激光器和调制器进行电信号到

光信号的转换。当不归零码(NRZ)数据传输速率超过40 Gbit/s,电光转换的带宽成为限制光互连速度的瓶颈。4级脉幅调制(PAM4)由于具有在相同带宽下2倍的数据传输速率,得到越来越广泛的应用。在光互连系统中,当单通道数据速率达到25 Gbit/s时,无论在接收端和发射端都需要采用时钟与数据恢复(CDR)电路从高损耗的信号里恢复出高质量的数据,再通过驱动电路将数据加载到光波上。如图1所示,PAM4调制的CDR电路在收发两端的电-光和

收稿日期: 2018-06-28
网络出版日期: 2018-07-31



▲图1 典型5G应用下光通信收发机系统架构

光-电转换都是核心部件。在电-光转换接口,高速串行电信号经过高损耗电路板导致信号质量严重下降,通过PAM4 CDR对信号进行恢复,得到低抖动的时钟和数据。在光-电转换接口,由于电光调制器的插入损耗及光纤传输损耗等,光电探测器接收到的有损信号同样需要CDR进行数据恢复。

CDR相对于锁相环(PLL)的区别主要在于鉴相器的设计上,CDR基本的组成部分包括鉴相器(PD)、电荷泵(CP)、环路滤波器、压控振荡器(VCO)等。鉴相器通过用VCO的输出时钟对输入数据进行采样来获得控制信号,控制信号输出到电荷泵产生控制电压来调节VCO的振荡频率,由此恢复高质量的时钟信号和数据。PAM4 CDR相对于NRZ信号的CDR而言,其设计难度增加很多,体现在:首先,高速多幅度信号的量化。PAM4信号与NRZ信号相比,对信噪比和电路的线性度要求很高,在对PAM4信号进行量化时,需要3个阈值,由于每级信号间的幅度降低为NRZ信号的三分之一,那么对于阈值的偏差容忍也降低了很多,如何准确地选择合适的阈值是一个难点。此外,由于PAM4信号具有确定性抖动,对于高速信号而言,采样时钟的窗口变小,对时钟抖动的要求提高,增加了时钟链路的设计难度。其次,PAM4信号中多种幅度转换类型下的时钟和数据对齐。PAM4信号有12

种电平转换模式,远多于NRZ信号的2种,在进行时钟数据边沿对齐时,其复杂度会增大很多。因此,需要选择合适的转换边沿来进行时钟与数据对齐,来降低鉴相器设计难度,减小误码率。由此可见,高速PAM4 CDR电路不仅需要考虑传统高速电路设计中的电路带宽、抖动、功耗等问题,还要结合新的调制格式下数据的特点来进行电路设计。

2 PAM4时钟与恢复关键技术

光通信中采用时钟与数据恢复技术实现2个功能:首先,利用本地产生的多相位时钟对数据多次采样,判断数据比特的边沿,并通过PLL将时钟边沿与其对齐,从而实现与数据同频率、同相位时钟的恢复。其次,利用已同步时钟的最优相位对输入数据采样,使其实现最高的输入信噪比,并把采样结果作为已恢复数据输出。如图2a)所示为传统的过采样型CDR,其中每比特数据采用数据(D_n)和边沿(Edge)2个时钟相位进行采样,并最终将Edge相位的时钟与数据边沿过零点对齐。其工作原理基于Edge相位采样的数据值分别与上一周期数据 D_n 及本周期数据 D_{n+1} 进行比较的结果:当Edge与 D_n 的结果同为逻辑1或0时,表明Edge相位超前于数据跳转边沿,判决结果为“超前(Early)”;而当Edge与 D_{n+1} 的结果相同时,表明Edge相位滞后于数据跳

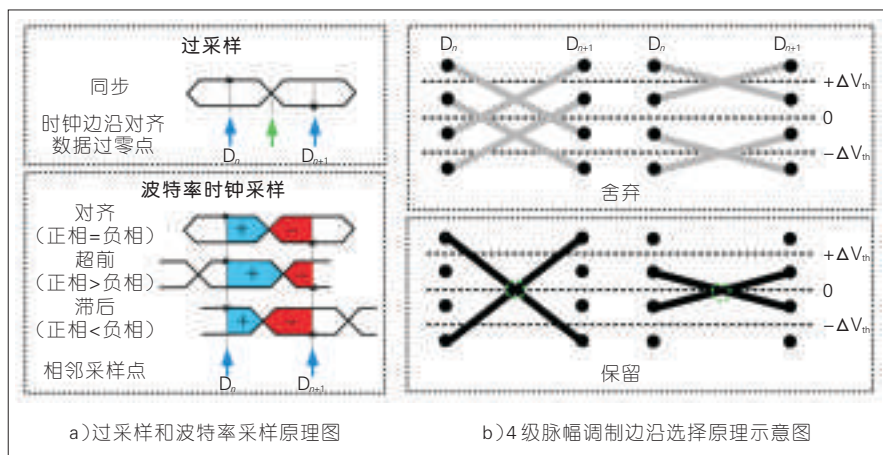
转边沿,判决结果为“滞后(Late)”。随后锁相环路根据此结果反向调节时钟相位,最终实现时钟相位与数据边沿的对齐。不难看出:过采样型CDR需要2倍于数据率Nyquist频率的时钟以产生足够多的相位进行采样,这带来了硬件开销的增大和系统功耗的上升。

2.1 波特率采样技术

本文中,我们提出一种新型的采样技术,每个数据比特仅需要1个采样时钟相位便可实现时钟与数据边沿的对齐。具体来说,本技术使用积分型电路计算两次采样之间电容极板上电荷的累加值,对应于计算图中数据比特覆盖的阴影区面积(如图2a)所示)。当差分输入进行数据翻转时,阴影面积在过零点之前为正,过零点之后为负(正相和反相信号以水平线为轴进行反转)。因此,当时钟与数据边沿对齐时正负面积相等,积分值恰好为零;而当时钟超前于数据时,正相面积大于负相,积分值为正数非零值;反之当滞后时积分值为负。由于此技术下时钟频率仅需要和数据Nyquist频率相同,因此称之为波特率采样技术,此种类型的CDR会带来硬件开销的节省和系统功耗的下降。

2.2 边沿选择技术

图2b)中所示为PAM4信号边沿的瞬态特性:PAM4差分信号逻辑电



▲图2 波特率采样和边沿选择原理图

平变化时会产生多个“过零点”(差分信号电压相等的瞬间),而上述过零点在时间上并不平均分布于数据边沿附近,其分布与前后比特码型相关,并由此集中于几个分离的时间点附近^[4]。CDR 环路试图将时钟相位(例如:上升沿)向数据转换的边沿对齐,在这种情况下最终锁定的时钟相位将分布于多个时间点,相当于在上述区间内随机游走造成时域抖动。本文中我们采用的策略为只选择其中具有最大发生几率的信号边沿,即仅选择逻辑 ± 3 向 ± 3 、 ± 1 向 ± 1 的数据比特作为时钟/数据同步的判据。在此策略下,所有数据边沿试图向同一个时间点对齐,避免多个过零点导致的CDR锁定后时钟相位的随机游走,也避免了由此引入的时域抖动。

2.3 最优采样与阈值调节

PAM4 调制信号相比 NRZ 信号,虽然在占用相同硬件带宽的前提下实现了等效数据率的翻倍,但在信号处理及其硬件实现上带来了额外设计挑战。首先,PAM 信号对码间干扰(ISI)更加敏感,而逻辑 ± 3 之间所需转换时间比逻辑 ± 1 之间更长。这就意味着比特边沿具备相同上升/下降时间(或硬件带宽)前提下,前者拥有更少的剩余稳定时间;极端情况下 ± 3 之间短比特来不及完全建立到其理想电压值,但后者逻辑 ± 1 之间的转

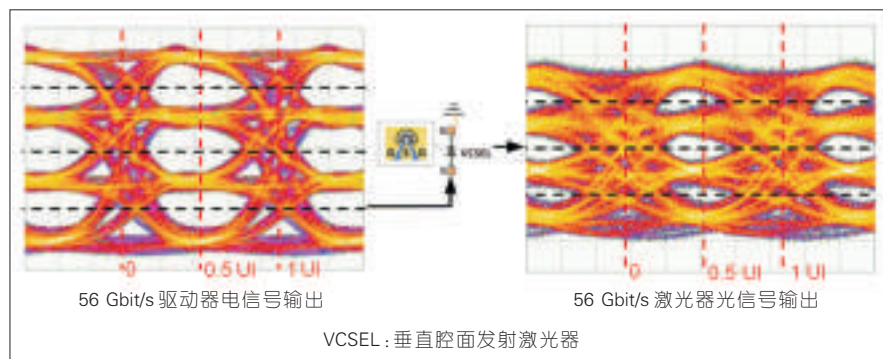
换建立时间充足。如图3所示,描述了上述情况的结果,如果沿用传统过采样原理使用与边沿相差0.5 UI的时钟相位采样数据,由于最高幅度信号建立未完成无法获得最高的输入信号信噪比,实际的最高信噪比采样点相对图中0.5 UI处存在偏移。

其次,在多幅值调制中特有的难题是PAM4信号的非线性失真。具体来说,由于电信号输入信道的损耗或者电-光转换时引入的非线性,PAM4信号的3个内眼可能具备不同的眼高与眼宽,这种情况下如果CDR使用线性分布的阈值(图3中横向黑色虚线)判别逻辑电平数值,将带来判决误码率的上升。例如:在直接调制型垂直腔体表面发射激光器(VCSSEL)的光电发射机中,由于激光器本身非线性会导致光眼图的上升、下降时间不对称;而VCSSEL偏置电流较高时,其逻辑高的光功率受到压缩不再与

输入电流成正比例关系,导致PAM4信号中逻辑 ± 3 的眼高略低于逻辑 ± 1 的3倍。

3 系统级设计

基于PAM4信号CDR的关键技术,我们设计并实现了一款50 Gbit/s PAM4输入的CDR芯片,其系统架构如图4所示。25 G Baud/s的PAM4信号进入CDR后到达PD模块,PD由4个时间交织的1/4速率通路并行而成,每条通路工作在6.25 Gbit/s。每条PD通路由1个前端电路(PD-FE)、重定时寄存器、PAM4译码器和1个逻辑电路模块构成。其中PD-FE采用了3个并行的判决器来量化具有4个电平信息的PAM4信号,并将其输出为3位温度计码判决结果;译码器负责将温度计码转换为二进制码,即代表2倍权重位的最高权重位(MSB)和1倍权重位的最低权重位(LSB)(图4中MSB_6G和LSB_6G)信号。需要注意的是:PD时间交织的采样后,MSB_6G和LSB_6G均为6.25 Gbit/s的NRZ数据;该数据通过串行转换器进行4:1变换,并汇聚到单路25 Gbit/s再输出给驱动器供光器件或测试仪器使用。在串行转换中,相比于传统结构需要多次重定时,我们使用CDR恢复出的正交相位数据^[4],天然满足了转换中对各路数据相对延时的需求。如图4所示,PD-FE中除3位判决器之外我们还设计一种新型的积分器,用来实现前述相邻数据的积分,并据此给出调节时钟相位的超前



▲图3 4级脉幅调制信号的最优采样点偏移和非线性失真

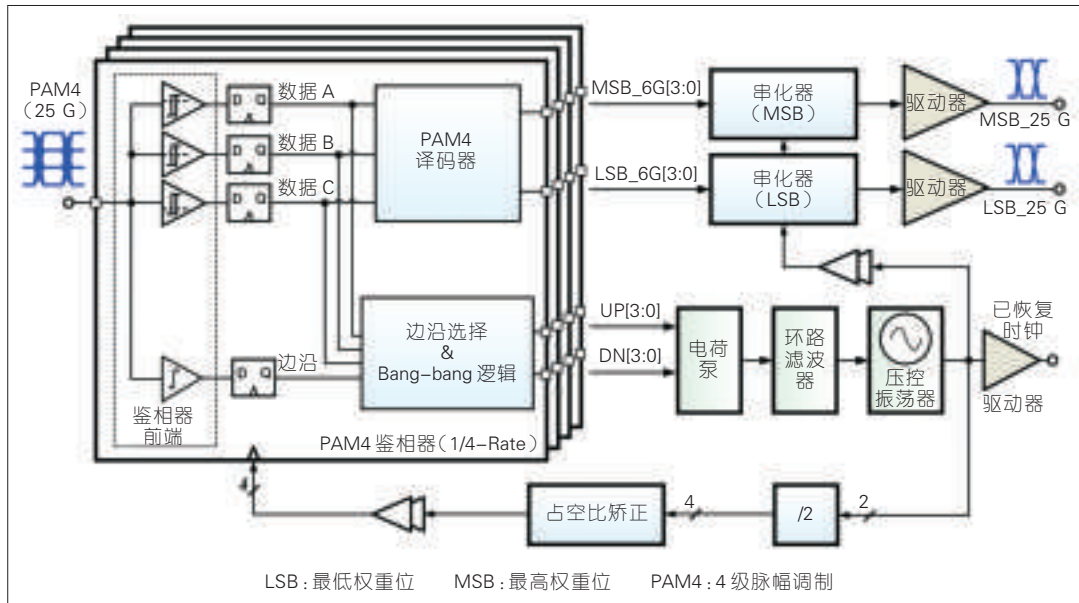


图4 PAM4时钟与数据恢复芯片系统架构

(DN)/滞后(UP)信号,进而控制锁相环路中的CP对环路滤波器(LPF)充放电,闭环调节时钟相位。本文中CDR芯片集成工作于12.5 GHz频段的电感电容型压控振荡器(LC-VCO),其输出信号经过分频器除2(/2)之后可以形成4相位6.25 GHz时钟作为PD采样所用。CDR的锁相环路由PAM4 PD、CP、低通滤波器(LPF)、VCO、/2分频器和占空比矫正器(DCC)组成,它的带宽设计为5~15 MHz可调节,并通过片上寄存器配置电荷泵充放电电流、环路滤波器电阻电容来实现。

4 电路模块级设计

PAM4信号的时钟与数据恢复中最关键的电路模块是PD,因其工作在整个CDR的最高速率25G Baud/s,并且负责对带有码间干扰和非线性失真的PAM4信号的逻辑判决。如图4所示,PD的核心部分是其前端电路(图中简称为PD-FE),它由并行的3条数据通路和1条边沿通路构成,而每条通路均包含了1个判决器。由于PAM4信号具有4个不同的逻辑电平,因此判决器需依据3个不同的电压阈值来判决上述逻辑,分别为对对应于+/-符号判决的逻辑阈值0,以及对

应于±3逻辑电平的判决阈值±2。每路PD-FE的输出先进入灵敏放大器(SA)进一步放大,再送入SR型锁存器进行逻辑电平再生。此时PD判决出的3位数据逻辑信号(DataA, B, C)表现出温度计编码特性,需要在数据输出之前转换为二进制码;并且通过双值逻辑产生出当前时刻数据和时钟边沿相对位置关系的指示信号,指导锁相环路进行时钟恢复达到数据与时钟边沿的实时对齐。

图5描述了本文提出的波特率采样技术的工作原理。其中,φ0、φ90、φ180和φ270分别为采样时钟一个周期中的4个相位0°、90°、180°和270°;PD前端在1个时钟周期内,将采样过程分成3个步骤进

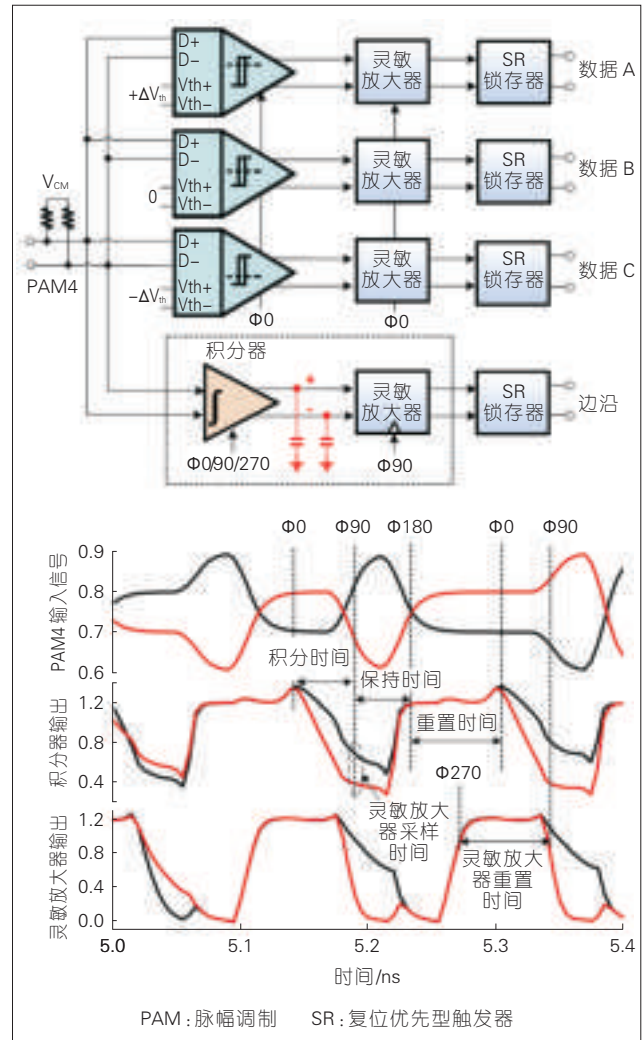


图5 鉴相器电路原理图及其瞬态工作原理

行：积分阶段、保持阶段和复位阶段。在积分阶段，输入差分信号根据幅值和正负关系通过电容放电将输出电压分开；在保持阶段，上述差分电压输出被保持一段时间不变，以作为后续SR锁存器的输入保持稳定；上述阶段完成时数据判决结束，进入复位阶段，输出节点重新被上拉到电源电压，等待下一采样周期的电容放电过程。需要注意的是：上述过程中，仅需要数据比特中心相位的时钟采样点，而节省了边沿相位采样点。

本文应对信号多过零点的数据转换边沿，仅选择其中对称变化的码型进行时钟对齐。具体来说，鉴相器恢复的温度计码数据在向二进制转换之前直接交给边沿选择器，其中A<2:0>和B<2:0>分别代表鉴相器输出的前一比特和当前比特信息。以逻辑±3之间的转换为例，边沿选择器中的组合逻辑部分当且仅当识别出上述码型时，输出逻辑高电平判断结果。此结果在单相时钟型寄存器(TSPC)型与门逻辑中进行重定时，并作为选通信号控制BB逻辑的时钟相位调节指示信号，仅在有效码型的前提下将相位调节传递给下一级，否则整个锁相环路无动作。

由于本文CDR采用1/4速率时间交织形式采样数据，每路恢复数据初始速率在6.25 Gbit/s；上述4比特数据在6.25 GHz和12.5 GHz时钟的控制下分别进行2次2:1并行至串行转换，并最终使用电压型串连电阻终端(SST)的驱动器进行输出。输出端反相器导通电阻连同输出端串联电阻构成匹配终端50 ohm，吸收来自负载信道的信号反射。传统结构2:1并行至串行转换采用5个锁存器，先将两路数据时序对齐再彼此平移错开180°；本文中我们在第2次2:1转换中采用直通结构，利用多相位之间时序差节约上述动态锁存器电路。

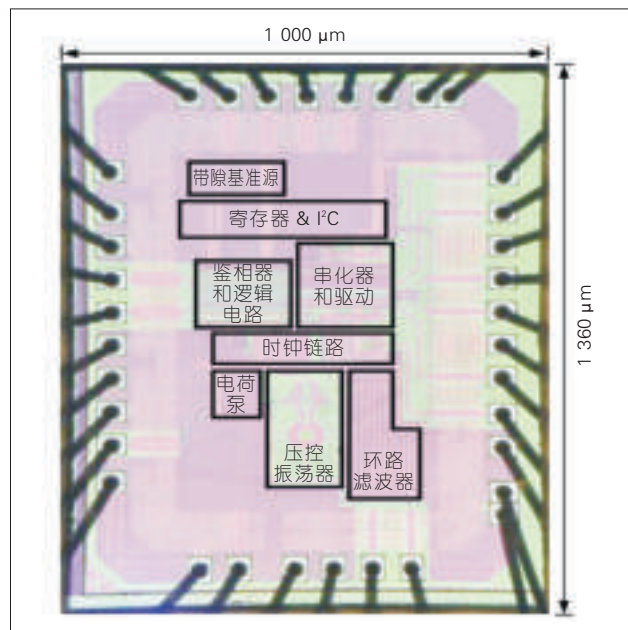
5 测试结果

本文中我们提出的PAM4信号时

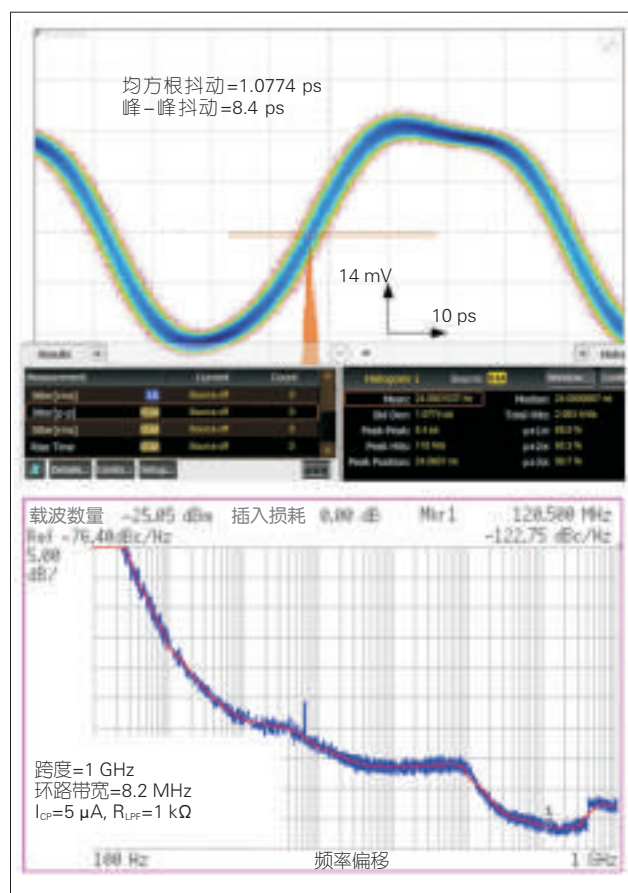
钟与数据恢复技术分别在65 nm和40 nm互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺下进行2次流片得到验证：如图6中所示为利用波特率采样技术的65 nm 50 Gbit/s PAM4 CDR芯片，该芯片共占用面积1.36 mm²并包含焊盘和3 kV静电损伤(ESD)保护环。芯片的功能和性能测试均采用直接PCB金线键合的封装形式。为测量CDR误码率，25 G Baud/s的PAM4信号采用PRBS-9编码作为输入，该信号在到达待测芯片之前经历同轴电缆线和板上传输线的高频损耗。CDR芯片从输入PAM4信号中恢复出2路25 Gbit/s的NRZ信号，分别对应于PAM4解调之后的MSB和LSB位，并输出给30 G误码仪分别进行测量对应的BER。

在时钟恢复性能的相关测量中，双通道64 GSs采样率的任意波形发生器用来产生50 Gbit/s PAM4输入信号，而80 GSs实时采样示波器用来测量CDR恢复的12.5 GHz时钟。如图7所示，该时钟具备均方根时域(RMS)抖动为1.08 ps，峰-峰值时域抖动为8.4 ps；而

CDR锁相环路的闭环相位噪声分别在1 kHz、8.1 MHz以及120 MHz频偏



▲图6 4级脉幅调制时钟与数据恢复芯片显微照片



▲图7 时钟恢复测试结果：时域抖动与相位噪声

处,测试得到的结果为: -93 dBc/Hz、 -112 dBc/Hz 以及 -122 dBc/Hz。

图8所示为本文中CDR芯片实时数据恢复的误码率(BER),测量时芯片输出到误码仪并实时与信号源

较明显码间干扰,进而限制了BER未完全达到0。

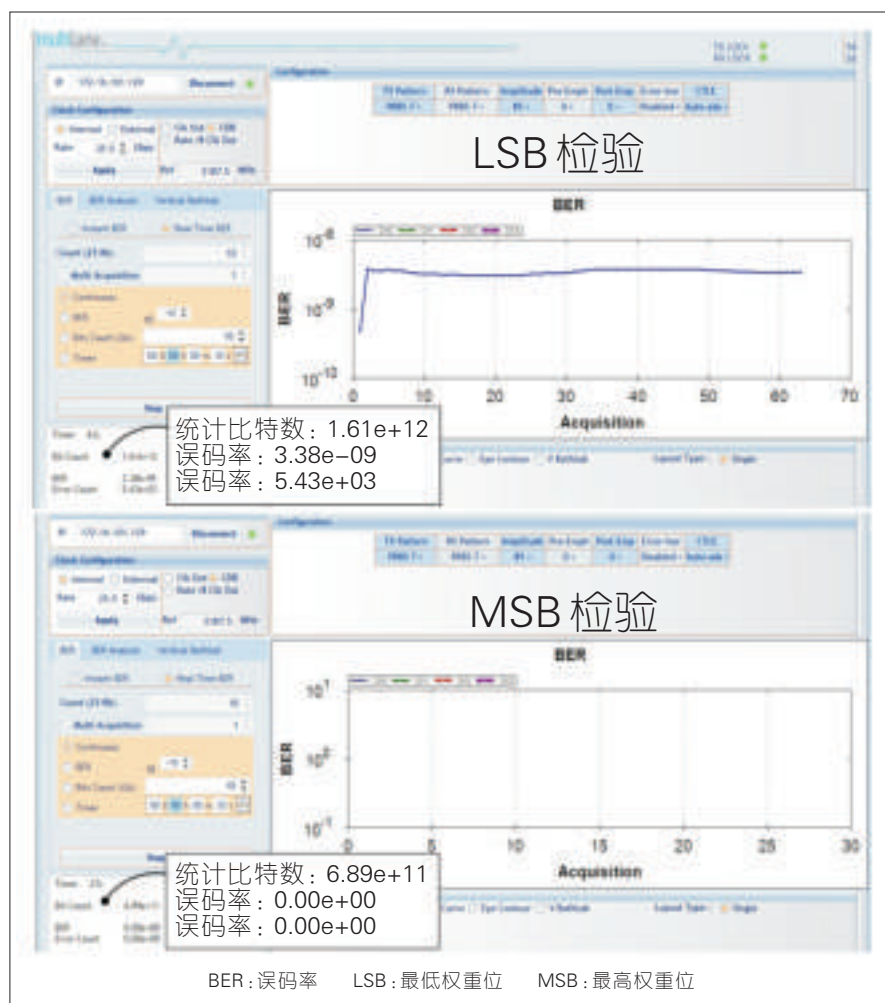
6 结束语

本文中我们介绍了单路50 Gbit/s

时钟1.08 ps RMS的时域抖动,并且还实现了 3×10^{-9} 的数据误码率以及6.27 pJ/bit的能耗效率。

参考文献

- [1] ZERBE J L, WERNER C W, STOJANOVIC V, et al. Equalization and Clock Recovery for a 2.5–10-Gb/s 2-PAM/4-PAM Backplane Transceiver Cell [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2003, 38(12):2121–2130. DOI: 10.1109/JSSC.2003.818572
- [2] LEE J, CHIANG C P, PENG P J, et al. Design of 56 Gb/s NRZ and PAM4 SerDes Transceivers in CMOS Technologies [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2015, 50(9): 2061–2073. DOI: 10.1109/JSSC.2015.2433269
- [3] TOIFLT, MENOLFI C, RUEGG M, et al. A 22 Gb/s PAM-4 Receiver in 90 nm CMOS SOI Technology [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2006, 41(4):954–965
- [4] CHEN E, HOSSAIN M, LEIBOWITZ B, et al. A 40 Gb/s Serial Link Transceiver in 28 nm CMOS Technology [C]//2014 Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers. USA: IEEE, 2014. DOI: 10.1109/VLSIC.2014.6858361

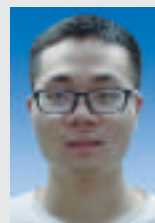


▲图8实测50 Gbit/s 4级脉幅调制信号实时数据恢复的误码率

的原始数据逐个比特进行对比。其中,MSB数据输出所对应的BER为0(低于 10^{-12} 认为无误码输出);LSB数据对应的BER约为 3×10^{-9} ,满足带前向纠错功能的PAM4通信网络的需求(常见数值为 $10^{-4} \sim 10^{-6}$)。通过测试发现:由于该芯片CDR输入未集成信道均衡,PAM4信号到达CDR已存在

速率光通信高速PAM4调制下电路设计的挑战和潜在解决方法,提出了一种基于积分前端电路的数据与时钟恢复技术,该技术能够在高速率下节省鉴相器和时钟网络近一半硬件开销和功耗代价。上述技术通过65nm CMOS工艺进行流片验证,实测获得最高51 Gbit/s PAM4信号输入下恢复

作者简介



廖启文,中国科学院大学在读博士研究生;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。



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



祁楠,中国科学院半导体研究所特聘研究员,中国科学院“百人计划”入选者,中科院半导体所-光梓科技“高速光电集成电路联合实验室”主任;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电路芯片;已发表论文30余篇,获得授权专利3项。

高速高密度光电共封装技术

High-Speed and High-Density Optoelectronic Co-Package Technologies

孙瑜/SUN Yu^{1,2}

刘丰满/LIU Fengman^{1,2}

薛海韵/XUE Haiyun^{1,2}

(1. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029;

2. 华进半导体封装先导技术研发中心有限公司, 江苏 无锡 214135)

(1. Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;

2. National Center for Advanced Packaging Co., Ltd (NCAP China), Wuxi 214135, China)

信息技术的广泛应用和各种新业务的不断出现, 导致网络容量迅速增长, 据估计到 2020 年信息量增长到惊人的 44 Z(10²¹) 字节。未来数据中心面临的巨大挑战之一是大量的数据需要被存储、传输和处理。此外, 随着多核处理器、内存需求和输入/输出(I/O)带宽需求的持续增加导致了网络拥塞和连接瓶颈。随着带宽的增加, 功耗也急剧增加, 数量传输数据所需的能量限制系统性能。作为下一代互连技术强有力的竞争者, 光互连具有宽频带、抗电磁干扰、强保密性、低传输损耗、小功耗等明显优于电互连的特点, 是一种极具潜力的电互连替代或补充方案^[1]。同时可以充分利用波分复用(WDM)技术, 尤其是密集波分复用(DWDM)技术发挥光互连带宽优势, 实现高

收稿日期: 2018-06-23

网络出版日期: 2018-08-01

基金项目: 国家科技重大专项(2014ZX02501); 江苏省省重点研发计划(BE2017003-1)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 04-0027-006

摘要: 分析了高速高密度光电共封装中 2.5D、3D 集成技术, 提出并验证了 2 种 2.5D 光电共封装结构: 采用硅转接板的光电共封装和采用玻璃转接板的 2.5D 结构, 经仿真得到在 40 GHz 工作时可以实现较低的插入损耗, 并进行了工艺验证, 制备了硅转接板和玻璃转接板样品。还提出了一种新型基于有机基板工艺的 3D 光电共封装结构, 该结构相比其他 2.5D 和 3D 结构尺寸更小、更薄, 设计更灵活。对该结构进行了工艺验证, 制作了光探测器(PD)与跨阻放大器(TIA)共同集成的三维光电共封装样品。

关键词: 光电共封装; 光电封装; 混合集成; 三维封装

Abstract: In this paper, high-speed and high-density optoelectronic co-packaging structures are analyzed. Two optoelectronic 2.5D co-packaging structures, including co-package based on silicon interposer and glass interposer are proposed and fabricated. Simulation results show that low insertion loss can be achieved in 40 GHz operation. A new optoelectronic 3D co-packaging structure based on the organic substrate process is proposed. Compared with other 2.5D and 3D, the structure is smaller and thinner, and the design is more flexible. The three-dimensional photoelectric co packaging samples integrated with photodetector (PD) and trans-impedance amplifier (TIA) are fabricated.

Keywords: optoelectronic co-package; optoelectronic package; hybrid integration; 3D package

速、海量信息传输; 但成本和规模化是光互连在数据中心内使用光学的最大障碍。

由于采用高频段、更宽频谱和新空口技术, 5G 基站带宽需求大幅提升, 预计将达到长期演进(LTE)的 10 倍以上。5G 单个基站前传带宽为 3×25 Gbit/s, 中传和回传在建设初期带宽峰值高达 5.8 Gbit/s, 均值也高达 3.4 Gbit/s, 成熟期基站带宽峰值将达到 20 Gbit/s。以一个大型城域网为例, 5G 基站数量 12 000 个, 带宽收敛比为 6:1。核心层的带宽需求在初期就将超 6 Tbit/s, 成熟期将可能会超过 1 Tbit/s。因此, 在 5G 传送承载网的接入、汇聚层需要引入 25 Gbit/s 或者

50 Gbit/s 速率接口, 而核心层则需要引入 100 Gbit/s 及以上速率的接口。因此, 5G 时代的互连链路必须采用光互连传输^[2]。

随着 5G 时代高带宽的计算、传输、存储的要求, 以及硅光技术的成熟, 板上和板间也进入了光互连时代, 通道数也大幅增加, 由专用集成电路(ASIC)控制多个光收发模块。在封装上要将光芯片或光模块与 ASIC 控制芯片封装在一起, 以提高互连密度, 从而提出了光电共封装的相关概念。

光电共封装较传统的板边以及板中光模块在带宽、尺寸、重量和功耗有重要的优势。传统光互连采用

的是板边光模块,将光收发模块单独制作封装为可插拔光模块或有源光缆,组装在印制电路板(PCB)边缘,其工艺比较成熟,已广泛商用;但这种方式电学互连较长,存在信号完整性问题,模块的体积较大,互连密度低,多通道时功耗较大。另外一种比较成熟的是板中光模块,是为了缩短光模块与 ASIC 芯片的距离,而将光收发模块组装在 ASIC 芯片旁边。这样电学互连较短,信号完整性压力较小,互连密度提高,但仍受限于电学连接器和光学连接器。互连功耗相对板边光模块得到改善,可靠性需求增加。光电共封装是将光收发模块与 ASIC 芯片封装在一个封装体内。一种方式是一种 2.5D 封装,将光收发模块与 ASIC 芯片共同封装在一个载板上,互连密度较高,功耗更低;还有一种三维堆叠方式,是将 ASIC 芯片与硅光芯片三维(3D)堆叠,实现了最短的电互连,损耗小,互连密度最高,功耗比 2.5D 方案更低。

然而光电共封装也面临一系列难点,包括高密度光电载板工艺、高精度的光电芯片组装工艺、阵列光纤连接器的装置耐高温性等。文中,我们介绍了国际上几种光电共封装方案,提出了基于硅基板、玻璃基板和板级埋入技术的光电共封装方案,并进行了仿真和制作。

1 光电共封装发展

随着近年来硅光技术的不断发展成熟,硅光芯片可以方便地将调制器、探测器、复用解复用、波导等集成在一颗芯片上,兼容互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺,采用硅光芯片的光模块是目前研究的热点。硅光芯片的光电共封装采用陶瓷基板、有机基板、玻璃载板、硅基板将电芯片与硅光芯片集成,封装集成也从 2.5D 向着 3D 光电共封装发展。

1.1 基于陶瓷基板的光电共封装

陶瓷载板由于其优异的电性能、

良好的导热性和稳定性,一直是光模块封装采用传统载板。Acacia 公司采用陶瓷基板制作了光电焊球阵列封装(OE-BGA),认为以此为基础可以实现 ASIC 芯片与光子集成电路(PIC)的光电共封装^[1]。如图 1 所示,硅光芯片 PIC、驱动器芯片和跨阻放大器(TIA)芯片倒装焊在一个 11 层的低温共烧陶瓷(LTCC)基板上,上面盖有铝金属盖,整个封装尺寸为 21.6 mm × 13.0 mm,下方焊球阵列封装(BGA)共有 369 个焊球。PIC 上具有 8 个调制器和 8 个锗探测器。发射和接收的射频信号在 BGA 陶瓷衬底内部走线,具有等长的路径和良好的电学性能,相比于在 PCB 上走线大大减小了传输损耗,结构也更紧凑。这种方案由于最后需要焊接在 PCB 板上,光纤阵列组装时需采用可以经受住 260°C 回流的胶来固定。最终 Acacia 公司的 OE-BGA 结构实现了 200 Gbit/s 速率的信号传输,功耗为 4.9 W。陶瓷载板可以做多层布线,但是布线线宽、线距较宽,在引脚密度高时,I/O 扇出十分困难;在成本方面,相比有机基板和硅基板等,陶瓷基板成本非常高。

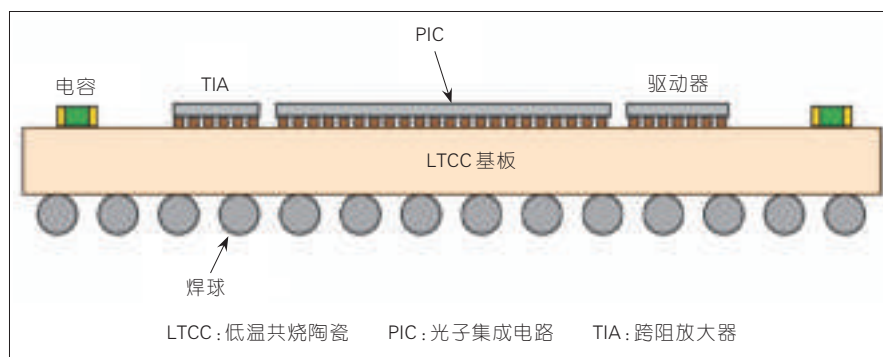
1.2 基于玻璃载板的光电共封装方案

玻璃材料由于其对光透明,对电绝缘性好的性能,很适合作为光电载板。佐治亚理工提出了一种基于玻璃载板的光电混合封装方案,如图 2 所示^[2]。该方案采用 150 μm 厚的玻璃载板,PIC 和驱动芯片和跨阻放大

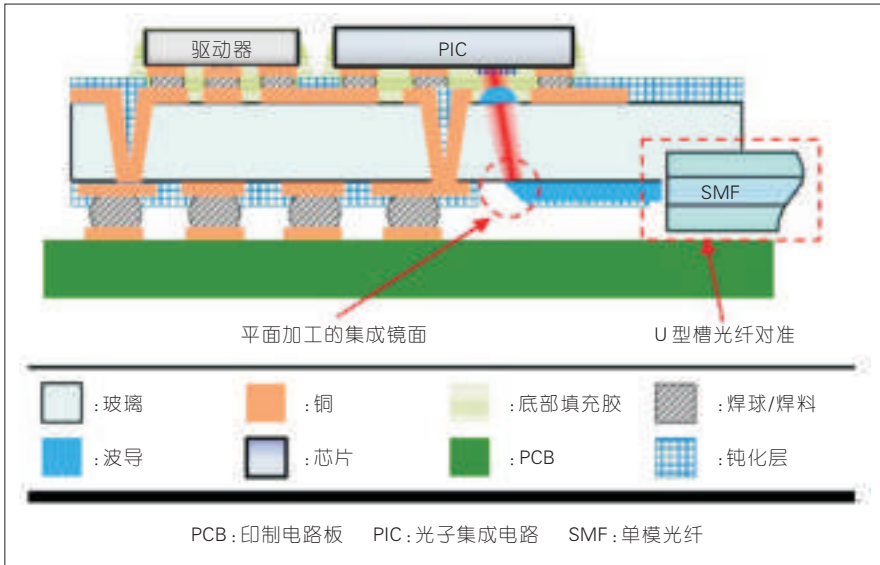
器倒装在玻璃载板上,光通过载板上的有机透镜聚焦到载板背面的波导中,与光纤耦合;电信号通过在玻璃基板上做金属通孔(TGV)引出。选用玻璃作为载板,优势在于电学损耗要小于硅;但缺点在于玻璃的加工比较困难,与常规微电子硅工艺不完全兼容,尤其对玻璃基板的打孔、电镀、清洗工艺等。目前还没有较稳定成熟的工艺,另外玻璃的散热能力较差,所以需要合适的散热方案。

1.3 基于硅转接板的光电共封装方案

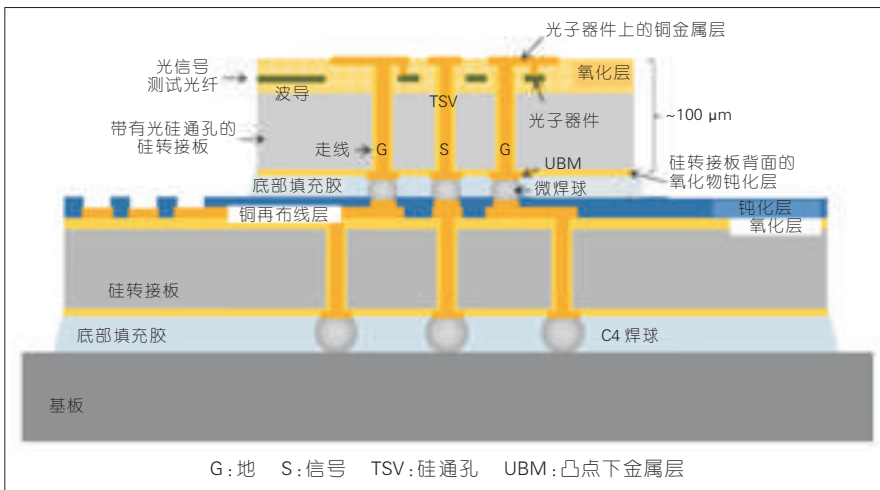
硅转接板采用硅晶圆加工技术,可以制作更小线宽的互连线,布线密度高,可以将高密度的引脚扇出,满足芯片互连需求;硅转接板与芯片都是硅材料,二者热膨胀系数(CTE)失配小,可以减小翘曲提高可靠性。采用硅转接板做光电共封装也是一个很好的方案,比如新加坡 IME 研发的基于硅载板的光电封装方案^[3],该方案中包含 2 个硅通孔(TSV)结构。如图 3^[4]所示,位于上面 1 个的是包含有光学器件结构的 PIC 在绝缘衬底上的硅(SOI)衬底的 TSV,位置靠下面的是只有通孔和电学再布线的体硅衬底的 TSV。其中,驱动芯片和 TIA 倒装焊在下面的硅转接板上,PIC 上的金属通孔可以实现更短的互连线和更好的电性能,光接口在硅光芯片上表面,更易于光耦合结构组装。硅转接板实现了良好的电学性能,将多通道的芯片的高密度引脚扇出,组装到 BGA 基板上,最终实现光模块与



▲ 图 1 光电焊球阵列封装的结构示意图



▲图2 3D玻璃基板封装示意图



▲图3 3D硅转接板封装方案的剖面示意图

ASIC 芯片共封装。

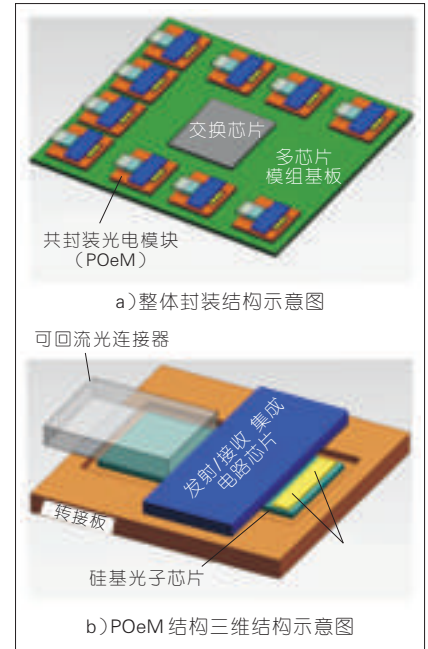
1.4 3D 光电共封装方案

在将光、电芯片并列排布在基板上的 2.5D 光电共封装方案的基础上，3D 光电共封装方案是目前研究的热点和趋势。3D 光电共封装将光电芯片垂直互连，实现更短的互连距离、更好的高频性能，并且集成度更高，封装更紧凑。

Oracle 提出了一种采用挖腔转接板实现封装模块的方案^[5]，图 4 所示。该方案采用陶瓷或有机基板作为转接板，在转接板上挖腔，把硅光

芯片放在腔内，再将收发集成电芯片组装在基板上方，形成一个“桥”结构，通过基板上线路实现光电互连，光芯片上组装可焊接的光耦合结构，形成一个共封装光电模块 (POeM)，多个 POeM 与 ASIC 芯片集成在一个载板上，实现多通道光电互连模块。

在 TSV 转接板基础上，新加坡 IME 把硅光芯片 PIC 也做成一个转接板，并将驱动芯片和 TIA 倒装焊在硅光芯片 PIC 上，通过 PIC 上



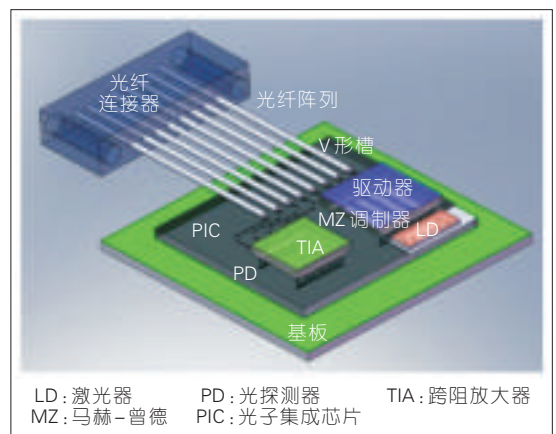
▲图4采用挖腔转接板实现封装模块的方案示意图

的金属通孔与下方的 TSV 转接板互连，激光器可以贴装在 PIC 上，如图 5 所示。这样既实现了良好的电学性能，又可以将多通道的芯片的高密度引脚扇出，实现高速多通道板上光模块共封装^[6]。

2 基于 TSV 硅/TGV 玻璃转接板的三维光电共封装

2.1 基于 TSV 硅转接板的三维光电共封装

针对多通道光电模块，硅转接板



▲图5 3D硅转接板封装方案示意图

可以将光电芯片的高密度引脚进行互连,实现多芯片光电共封装(方案如图6 a)所示),为此我们设计了高速硅转接板,采用样品假芯片(dummy芯片)设计了光电共封装方案,如图6 c)所示。将4颗dummy芯片组装在硅转接板上,根据高速电互连需求,设计正面2层、背面1层再布线层(RDL)的转接板结构。在TSV转接板的制作方面,硅转接板工艺能力可以实现20.32 cm(8英寸)或30.48 cm(12英寸)的TSV转接板晶圆、10×100 μm TSV无孔洞填充、最小40 μm节距微凸点,及最小10 μm/10 μm的线宽、线距,背面互连引出采用低成本TSV露头技术^[7],如图6 b)所示。通过电学仿真,我们设计TSV采用10 μm直径、100 μm高度,布线采用35 μm/15 μm的线宽、线距,转接板上传输线长在19 mm时,3 dB带宽

理论上可以支持到40 GHz,它的插入损耗仿真的结果如图6 d)中所示。

2.2 基于玻璃转接板的三维光电共封装设计和制备

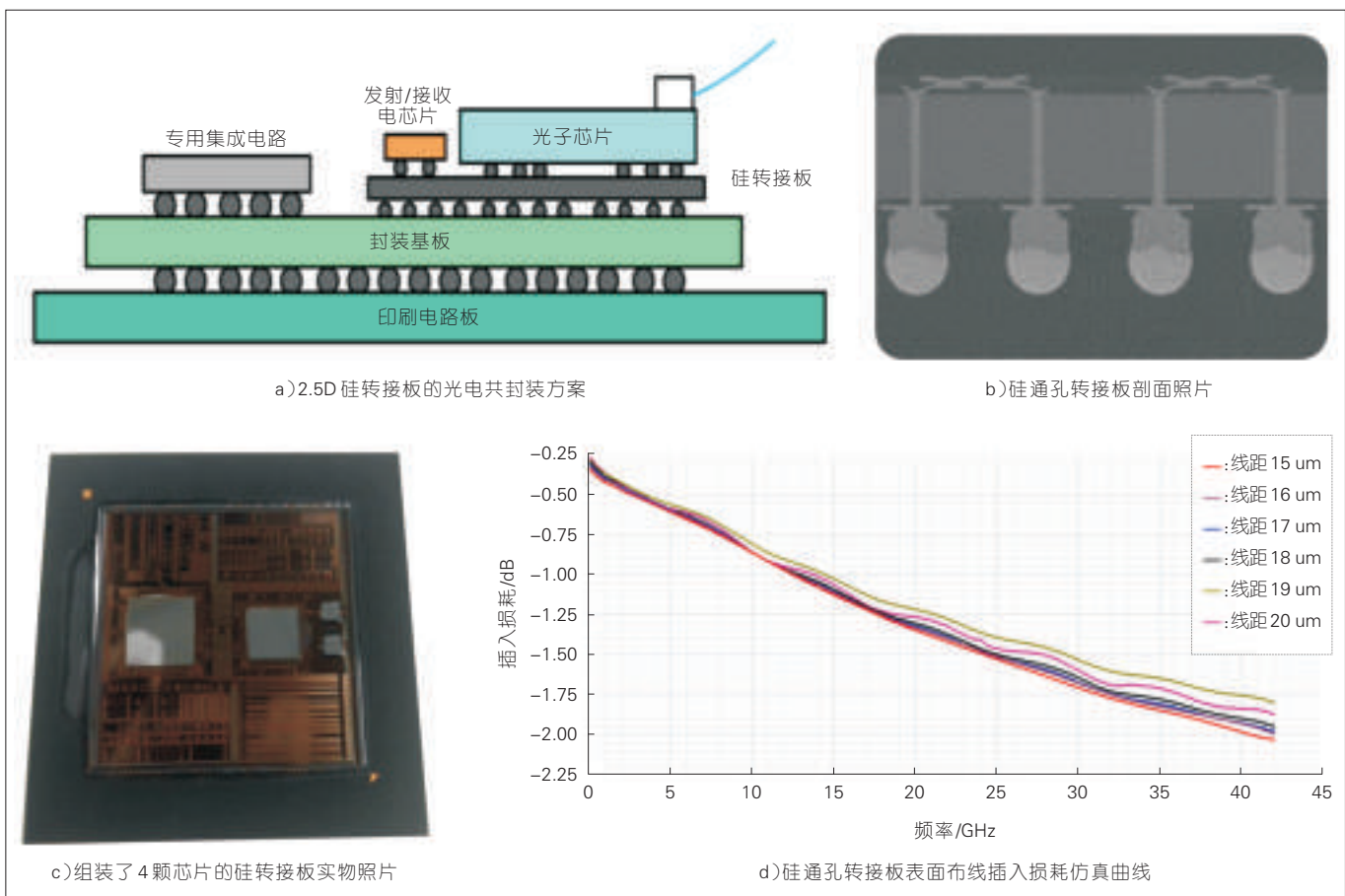
玻璃转接板具有透明、绝缘等良好的光电学性能,玻璃转接板2.5D光电共封装方案如图7 a)所示。但玻璃转接板加工工艺比较困难,我们对石英玻璃转接板的打孔、电镀、图形刻蚀做了多方面的研究,制作了玻璃转接板。同时,我们对TGV的电学性能进行了仿真,图7 b)是TGV的插入损耗曲线,图7 c)是TSV与TGV的插入损耗曲线对比。比较相同条件下TGV和TSV的损耗曲线(S21曲线),可以看出TGV的高频性能远好于TSV,并且金属直径越小,高频性能越好,当TGV直径小于70 μm时,插入损耗差别不大。因此考虑到制

作的可行性,我们针对70 μm直径TGV晶圆进行了研发制作。

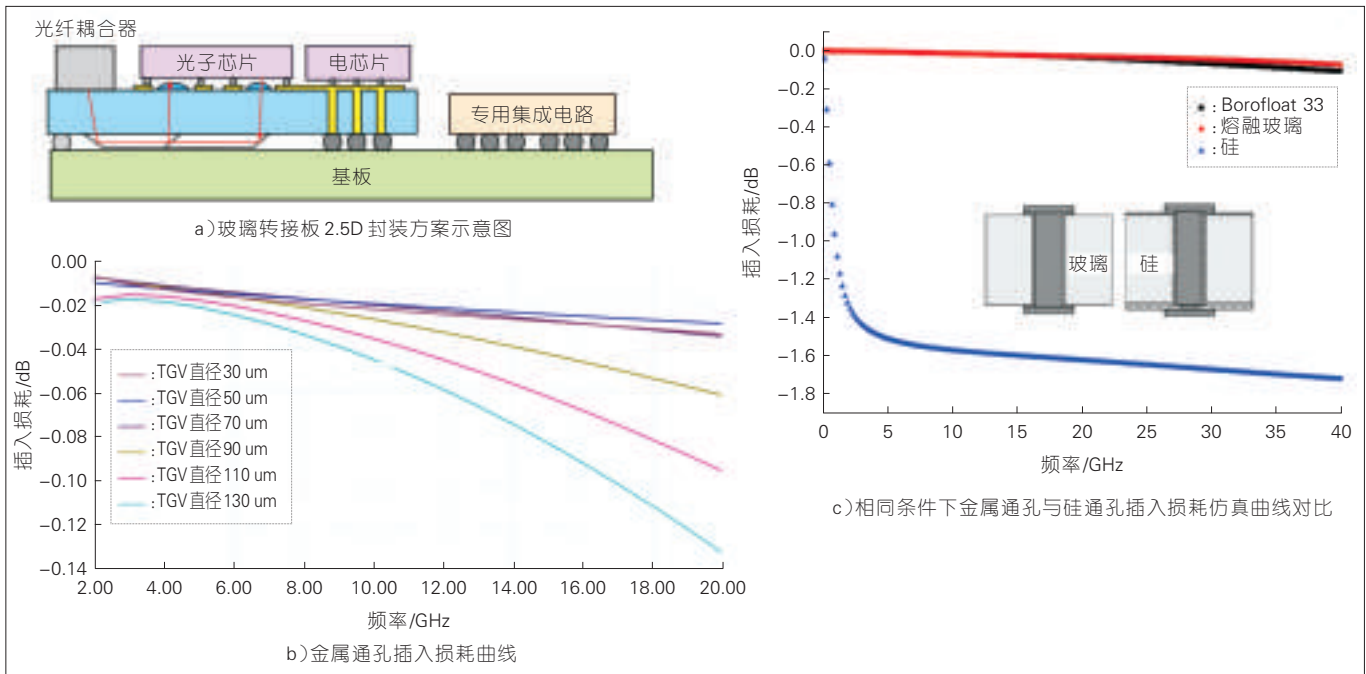
在15.24 cm(6英寸)的300 μm厚玻璃基板上,采用激光钻孔方式制作了70 μm直径的通孔,晶圆表面溅射一层100 nm/1 μm的Ti/Cu金属薄膜作为种子层,然后进行填实电镀铜,观测了电镀好TGV的X射线照片,可见TGV通孔电镀质量良好,之后对玻璃基板进行表面图形化蚀刻,最后在玻璃转接板表面做了镍钯金处理,将电芯片倒装键合在转接板上,完成玻璃转接板微组装。

3 基于板级工艺的三维光电共封装

随着基板技术的发展,有机基板材料如一些特种BT材料也具有良好的电、热性能,其热膨胀系数约为 3×10^{-6} ,可以与硅相比拟;有机基板加工



▲图6 光电共封装方案示意图

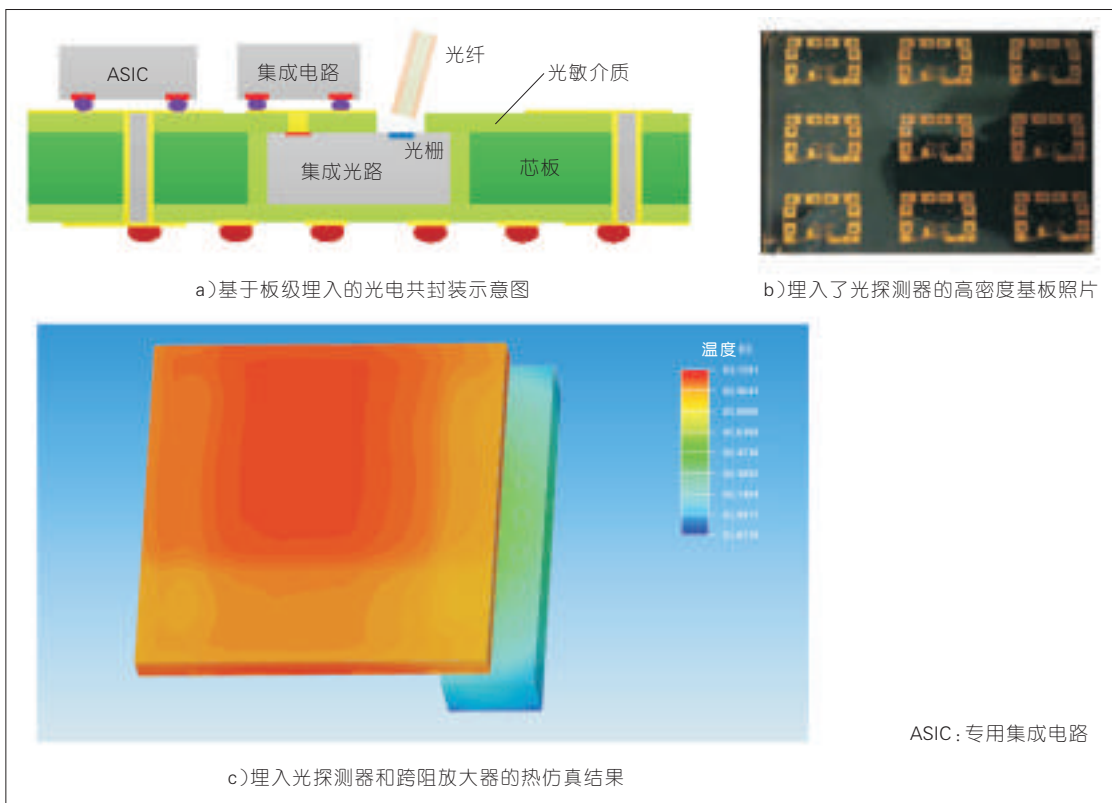


▲ 图7 采用玻璃转接板的设计仿真结果

走线线宽线距也已达到了 30 um 以下,可以满足芯片互连需求;有机基板工艺加工尺寸大,平均成本很低。因此,基于有机基板板级工艺的芯片

埋入技术成本低,性能好。我们设计了一种基于板级工艺的三维光电共封装方案^[8],如图 8 a)所示,将光芯片埋入有机基板中,电芯片组装在基板

上,将光电芯片的堆叠互连,ASIC 芯片组装在埋入光芯片的基板上,这种方案是一种三维封装结构,整个光电共封装结构尺寸比 2.5D 平面结构更



◀ 图8 基于板级埋入的光电共封装设计、照片和仿真结果

小,更紧凑;将芯片埋入到基板中,相比于其他三维封装结构,在Z方向上厚度更小(省去了部分基板厚度);基板上还可以再布线和组装其他光电芯片,设计上更灵活,集成度高。我们对这种3D共封装方案进行了工艺验证,将1×4光探测器(PD)芯片埋入BT有机基板中,通过刻蚀光敏薄膜,将电极和受光面暴露出来,再制作再布线层,将电极引出,图8b)是埋入了PD的有机基板照片,将TIA芯片倒装在基板表面,制作了基于板级工艺的光电模块样品,实现了光电芯片的三维集成。我们测试埋入PD后测试的I-V曲线,埋入后的光芯片正常工作。图8c)是埋入结构的热仿真结果,工作状态下TIA最高温度为63℃,PD最高温度为62℃,在器件正常工作温度范围内。

4 结束语

光电共封装提高了互连密度,并可以减小尺寸、重量和功耗。采用2.5D转接板和3D堆叠的光电共封装是目前高速光电共封装的主流研发技术。我们采用硅转接板和玻璃转接板设计了2.5D光电共封装结构,并完成了仿真和工艺验证,并提出了一种新型基于有机基板工艺的3D光电共封装结构,制作实现了光探测器与

电集成电路芯片的集成。

参考文献

- [1] KRISHNAMOORTHY A V, THACKER H D, TORUDBAKKEN O. From Chip to Cloud: Optical Interconnects in Engineered Systems for the Enterprise [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(15):3103–3115. DOI: 10.1109/JLT.2016.2642822
- [2] DOERR R C, HEANUE J, CHEN L, et al. Silicon Photonics Coherent Transceiver in a Ball-Grid Array Package[C]//Optical Fiber Communication Conference 2017.USA: OFC, 2017. DOI: 10.1364/OFC.2017.Th5D.5
- [3] CHOU B C, SATO Y, SUKUMARAN V, et al. Modeling, Design, and Fabrication of Ultra-high Bandwidth 3D Glass Photonics (3DGP) in Glass Interposers [C]//2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference (Ectc). USA: IEEE, 2013:286–291. DOI: 10.1109/ECTC.2013.6575585
- [4] YANG, Y. 3D Silicon Photonics Packaging Based on TSV Interposer for High Density On-Board Optics Module [C]//2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (Ectc). USA: IEEE, 2013: 483–489. DOI:10.1109/ECTC.2013.6575585
- [5] KRISHNAMOORTHY A V, THACKER H D, TORUDBAKKEN O. From Chip to Cloud: Optical Interconnects in Engineered Systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(15): 3103–3115. DOI:10.1109/JLT.2016.2642822
- [6] KIM D, YU L H, CHANG K F, et al.3D System-on-Packaging Using Through Silicon Via on SOI for High-Speed Optical Interconnections with Silicon Photonics Devices for Application of 400 Gbps and Beyond[C]//2018 IEEE 68rd Electronic Components and Technology Conference (Ectc). USA: IEEE, 2018: 834–840
- [7] ZHANG W, SONG C, XUE K, et al. Silicon Interposer Process Development for Advanced System Integration[J]. Microelectronic Engineering, 2016, 156: 50–54. DOI: org/10.1016/j.mee.2015.11.014
- [8] LIU F, GUO X, SHE Q, et al. Design and

Fabrication of Feasible 3D Optoelectronics Integration Based on Embedded IC Fanout Technology[C]//2018 IEEE 68rd Electronic Components And Technology Conference (Ectc). USA: IEEE, 2018:364–369

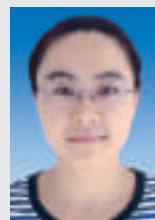
作者简介



孙瑜,中国科学院微电子研究所副研究员,华进半导体封装先导技术研发中心有限公司高级工程师;主要从事光电子器件集成、光电器件及模块封装、高频基板材料技术开发;参与多项国家重大专项02专项项目、国家“973”项目、“863”项目等;发表论文10余篇,获得专利20余项。



刘丰满,中国科学院微电子研究所研究员,华进半导体封装先导技术研发中心有限公司技术经理;主要从事微电子、光电子器件集成与封装技术;承担以及参与完成包括国家自然科学基金、国家重大专项02专项项目、03专项以及多项企业横向课题项目;发表论文20余篇,申请专利30余项。



薛海韵,中国科学院微电子研究所副研究员,华进半导体封装先导技术研发中心有限公司高级工程师;主要从事光电互连封装技术研究,包括硅基锗材料光电探测器的研制,高速、高密度光电集成、模块设计及100 G/400 G互连系统的光电集成及封装技术研发;参与多项国家重大专项02专项项目、“863”项目,并负责江苏省科技厅产业前瞻与共性关键技术重点项目;发表论文10余篇,专利申请30余项。

PAM4 技术在光通信应用中的系统分析

System Analysis of PAM4 Technology in Optical Communication Applications

朱梅冬/ZHU Meidong
陆建鑫/LU Jianxin

(中兴光子技术有限公司, 江苏 南京
210012)
(ZTE Photonics Technology Co., Ltd.
Nanjing 210012, China)

随着大数据、云计算和物联网时代的到来, 流量需求的急剧增长, 光器件带宽提升越来越困难, 迫切需要采用复杂调制方式。目前在不归零码(NRZ)调制方式升级方案中, 4级脉幅调制(PAM4)是最被看好的高阶调制方式, 它将支持光互联向更高速率迈进。无线通信进入了5G时代, 相比4G时代, 承载网流量将有2~3个数量级的提升, 在未来5G承载高速光模块中将广泛地采用PAM4技术。

多年来, NRZ调制一直是非相干光通信的主要技术, 但随着速率的提升, 如200 G/400 G, NRZ调制在色散影响、光电转换带宽和成本上遇到了较大的困难。

25 G以上的波特率, 在中长距传输时, 色散的影响开始显著; 光电转换带宽在60 Gbit/s以上出现了技术瓶颈, 或许要采用新的材料及技术才能不断突破这个瓶颈; 在成本上, 在相同的比特速率的条件下, PAM4的波特率只有NRZ的一半, 大大降低了光器件的带宽要求, 从而可以降低光器件成本。

收稿日期: 2018-07-10
网络出版日期: 2018-08-06

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 04-0033-005

摘要: 以太网发展已经进入了200 G/400 G新阶段, 4级脉幅调制(PAM4)作为高阶调制技术已经进入多个高速光模块的标准中。无线通信即将进入5G时代, 在5G承载网中PAM4调制方式将成为重要的技术方向。对PAM4技术在光通信应用中相关技术及指标做了详细分析, 并给出了PAM4系统仿真方案用以指导系统设计及器件规格定义。

关键词: PAM4; 线性; 误码率; 带宽; 判决电平

Abstract: Ethernet has entered into a new stage of 200 G/400 G development. As a high-order modulation technology, 4-level pulse amplitude modulation (PAM4) has been used in the standard of several high-speed optical modules. And PAM4 modulation will become an important technical direction in 5G bearer network. In this paper, the related technologies and specifications of PAM4 technology in the optical communication applications is analyzed in details, and the system simulation scheme of PAM4 is given to guide the system design and device specification definition.

Keywords: PAM4; linearity; bit error rate (BER); bandwidth; decision level

PAM4调制方式采用4个不同的信号电平来进行数据传输, 每个符号周期可以表示2 bit的逻辑信息(0, 1, 2, 3)。由于PAM4信号每个符号周期可以传输2 bit的信息, 因此要实现同样的信号传输能力, PAM4信号的符号速率只有NRZ信号的一半。实际上PAM4在电气和电子工程师协会(IEEE)中早已有相应的电接口标准, 但由于技术成熟度和成本的原因, 没有形成大规模应用。正在制定的200 G/400 G光电接口标准(IEEE 802.3bs)对PAM4信号的特性及参数进行了深入研究和定义。另外, 相对于光器件成本的增加, 电驱动芯片成本增加相对较小甚至可以忽略, 提升调制复杂度技术上可行, 而且更具经济性, PAM4调制技术成为必然的发展方向。如表1所示, 目前50 G以太网标准大部分则会考虑采用PAM4的

调制方式。

1 发送技术

1.1 速率转换

速率转换主要解决电接口与光接口之间的速率匹配问题。对单波而言, 一般速率转换有3种方式: 1路NRZ转1路PAM4, 波特率减半; 2路NRZ转1路PAM4, 波特率不变; 2路PAM4转1路PAM4, 波特率提升1倍。

对于2路转1路模式, 由于是2个输入, 如果输出采用简单叠加的方式, 由于延时不一样, 会造成波形变异, 时钟和数据恢复难度大, 判决误码率高。解决方案是: 先进行时钟同步, 再进行不同幅度差相叠加的方法, 在电域和光域上进行叠加都是可行的。对于1路转1路的信号, 没有同步的问题。

▼表1 高速光接口标准

光接口标准	距离/m	格式	波特率/G
400 G BASE-SR16	100	NRZ	26.6
400 G BASE-DR4	500	PAM4	53.1
400 G BASE-FR8	2 000	PAM4	26.6
400 G BASE-LR8	10 000	PAM4	26.6
200 G BASE-SR4	100	PAM4	26.6
200 G BASE-DR4	500	PAM4	26.6
200 G BASE-FR4	2 000	PAM4	26.6
200 G BASE-LR4	10 000	PAM4	26.6
100 G BASE-SR4	70/100	NRZ	10.3
100 G BASE-SR2	100	PAM4	26.6
100 G BASE-DR	500	PAM4	53.1
100 G BASE-SR4	70/100	NRZ	25.8
100 G SWDM	400	NRZ	25.8
100 G PSM4	500	NRZ	25.8
CWDM4/CLR4	2 000	NRZ	25.8
100 G BASE-LR4	10 000	NRZ	25.8
100 G BASE-ER4	40 000	NRZ	25.8
50 G BASE-SR	100	PAM4	26.6
50 G BASE-FR	2 000	PAM4	26.6
50 G BASE-LR	10 000	PAM4	26.6

CLR: 中距粗波分复用 NRZ: 不归零码 PSM4: 并行单模4通道
CWDM: 粗波分复用 PAM4: 4级脉幅调制 SWDM: 短波长波分复用

在实际应用中,可能还有4路NRZ转1路PAM4或4路PAM4转1路PAM4的速率变换模式,与2路转1路一样,需要时钟同步。

1.2 发送机线性要求

由于多电平调制,PAM4对器件的线性度有要求。当线性度差时,PAM4输出眼图的3个眼高度不一样,如图1所示,上面的眼高小,下面的眼高大,其误码率一般取决于最小的眼高。

在IEEE 802.3bs标准中定义了电平间隔错位度(RLM)^[1],来评估线性

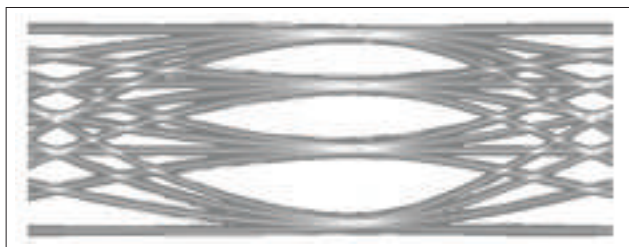
度指标,具体如式(1)。

$$\begin{aligned}
 L_{mid} &= (L_D + L_A) / 2 \\
 ES1 &= (L_B - L_{mid}) / (L_A - L_{mid}) \\
 ES2 &= (L_C - L_{mid}) / (L_D - L_{mid}) \\
 RLM &= \min(3 \times ES1, 3 \times ES2, \\
 & 2 - 3 \times ES1, 2 - 3 \times ES2) \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中, L_{mid} 为平均电平幅度,ES1为 L_A , L_B 电平相对 L_{mid} 的偏离程度,ES2为 L_C , L_D 电平相对 L_{mid} 的偏离程度。

RLM的物理意义是与理想电平相比时最大偏移度,IEEE 802.3bs中对电接口要求RLM值 ≥ 0.92 ^[2]。

电器件比较容易满足上述要



◀图1 非线性的眼图

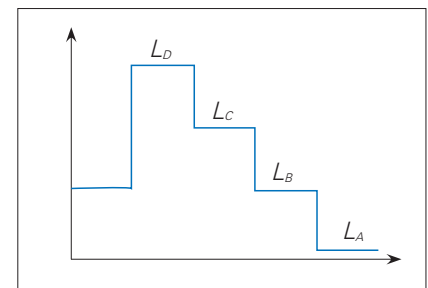
求。但对于光器件,可能有一定的挑战,特别是在DML高温场景下,激光器的P-I曲线工作区线性度可能比较差。这种情况下,通常要求电驱动芯片输出给光器件的PAM4信号幅度可调,通过这种方法来降低或消除光器件带来的非线性影响。具体的调整幅度因光器件差异来定,目标是补偿其非线性。

1.3 激光器相对强度噪声

相对强度噪声(RIN)在NRZ和PAM4中都是很关键的指标,它是激光器(LD)自身特性引起的,叠加在光信号上的噪声。不同的应用场景,该指标有所差异。

这里仅从与NRZ对比的方式给出PAM4系统中,说明相对强度噪声在PAM系统中的重要性。假设光信号NRZ的光调制幅度(OMA)与PAM4的 OMA_{out} (外层光调制幅度)大小一样,PAM4由于有4个电平(如图2所示),其最小信号约为NRZ的1/3,如果噪声大小与NRZ一样的话,PAM4的信噪比要差5 dB左右。因此,PAM4系统应用中对相对强度噪声有更高的要求。

IEEE 802.3标准族中,如100 G/200 G/400 G标准,有RIN取值的相关定义。在NRZ系统中,如100 G BASE-LR4中RIN最大为-130 dB/Hz,而40 G BASE-FR中RIN最大可以达到-132 dB/Hz。虽然200 G/400 G的标准还未完全定稿,但是从草案中可以查到PAM4系统的相关定义,例如:400 BASE-LR8中的RIN最大为-140 dB/Hz,400 G-PSM4中RIN最大



▲图2 PAM4的4个电平

为-142 dB/Hz。

1.4 信号频域补偿和整形处理

由于信道是具有频率选择性衰落,特别是高频成分,那么则会引起码间干扰。为了抗信道衰落,可以在发送侧,采用信号的频域补偿技术,主要有预加重或去加重技术,目的是为了增强发送信号的高频分量。这种技术在 NRZ 系统中比较常见,在 PAM4 中也可以应用。

整形处理技术具有代表性的是奈奎斯特滤波^[1],其主要原理是通过奈奎斯特脉冲整形来降低发送信号频谱,而不会恶化码间干扰。

2 接收技术

2.1 接收机的线性要求

接收侧的模拟器件主要有光器件光电二极管(PD/APD)和跨阻放大器(TIA)芯片。一般情况下,PD/APD 具有较大的线性工作区。与 NRZ 的 TIA 不同,PAM4 系统中要求 TIA 工作在线性区。

信号饱和是信号超出光电器件正常工作范围,造成信号失真。在 NRZ 系统中,能承受一定程度的饱和。但在 PAM4 系统中,饱和时从眼图上看会直接挤压 3 个眼的最上面的一个;严重时,中间的眼也会严重变形,对信号质量影响很大,误码率也随之急剧恶化。因此,PAM4 系统对饱和状态容忍度比较差。

饱和解决方式可以通过选择合适的接收光功率工作区域,适当降低 TIA 增益或后级放大器(如自动增益控制)的增益来避免饱和。

2.2 多电平判决

电平判决是系统中一个重要技术。判决电平幅度的选取直接影响误码率,相比 NRZ 只需 1 个判决电平,PAM4 接收需要 3 个判决电平,实现更复杂。以下 2 种情况,判决幅度要实现自适应调整:输入的模拟信号

幅度变强或变弱;输入信号线性度变化,即眼图上 3 个眼高发生变化。

对于时域采样位置,在眼图不对称情况下其中心位置不是最佳采样点。造成眼图不对称的原因可能是系统中的滤波器,也有可能是 LD 的上升时间与下降时间不一致,造成 3 个眼在垂直方向上有偏移。考虑到眼图的不对称性,希望接收机采样位置可进行自适应调整。

2.3 均衡器

均衡器能减少码间干扰,起到补偿作用的滤波器,如:前向反馈均衡(FFE)、判决反馈均衡(DFE)、连续时间线性均衡(CTLE)、最大似然序列估计(MSLE)等,这些技术都可以应用于 PAM4 系统中。其中,MLSE 用最大似然准则从接收信号中估计出正确的序列,性能最好,但算法复杂度较高,延时较长。

3 系统考虑

3.1 光功率预算

功率预算主要考虑出光功率、光调制幅度(OMA)、光链路损耗、发射机和色散眼图闭合度(TDECQ)、多径干扰(MPI)和接收灵敏度等,PAM4 在功率预算计算上与 NRZ 类似。对于同样的接收信号幅度,由于 PAM4 发送 4 个电平,最小信号眼图眼高比 NRZ 的小 5 dB 左右。因此,相比于 NRZ 方式,PAM4 存在着 5 dB 左右的调制代价。

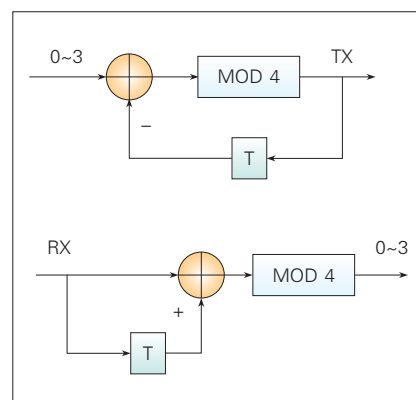
3.2 编码

与 NRZ 2 个电平不同的是:PAM4 有 4 个电平,分别用 0, 1, 2, 3 表示。在 IEEE802.3bs 标准中,有格雷编码和预编码,2 种码不是为了纠错,而是为了降低出错率。其在信道的编解码的流程为:发送侧按信号流依次为格雷编码、预编码^[4,5]、PAM4 信号输出,接收侧依次为 PAM4 信号输入、解预编码、格雷解码。

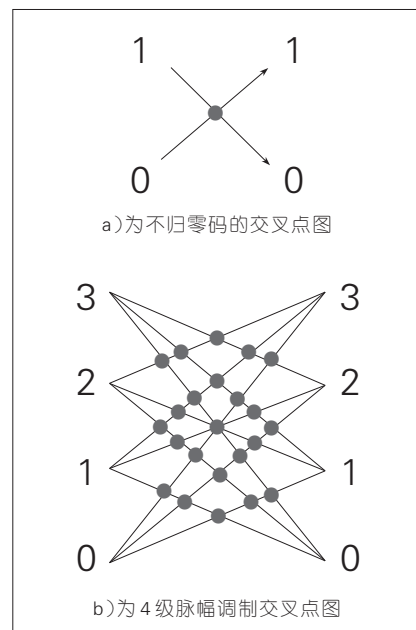
预编码及其解码如下(如图 3 所示):其中 T 为延时一个符号周期,MOD4 是除 4,取余数。它的好处是在突发误码和随机误码时,有 1.45 dB 的编码增益。

3.3 抖动

对 NRZ 信号来说,存在 0→1 和 1→0 2 种信号变换模式,只有 1 个交叉点,如图 4 a)所示。对于 PAM4 信号来说,一共有 12 种信号变换模式,交叉点多且离散,如图 4 b)所示。在接收端提取时钟时,时钟数据恢复(CDR)电路设计难度相对较大。另外,信号带宽直接影响了交叉点的离



▲ 图 3 预编码及其解码算法



▲ 图 4 2 种信号变换模式

散程度, PAM4交叉点离散程度影响信号抖动, 对CDR的设计提出了更高的要求。

3.4 测试码型

在测试眼图、消光比、光功率、误码率等指标时, 需要合适的测试码序列。NRZ的序列由二进制码组成, 即0/1; PAM4的序列是四进制码组成, 即0/1/2/3。这样一来, 原来用于NRZ系统测试的长度为 $2n-1$ 的伪随机序列码(PRBS $_n$), 在PAM4中不适合直接使用。同时, 为保证0/1/2/3电平都同等被遍历到, 还要取其反码, 即 $3-x$, 最终改造后的码型称为PRBS $_n$ Q, “Q”的含义为四进制。

IEEE802.3bs标准中定义PRBS13Q、PRBS31Q和四进制短强度随机码(SSPRQ)码型^[6]。其中, PRBS31Q码太长, 测试时间长; PRBS13Q码短随机性不够强; SSPRQ码型码长适中, 容易锁定, 随机性强也适中, 实际测试中使用最多。

3.5 发射机和色散眼图闭合度

发射机和色散眼图闭合度(TDECQ)^[7]是测量光发射机的垂直眼图闭合度, 取代传统的发射机和色散代价(TDP), 用于PAM4系统光信号质量的评估测量, 详细的算法参考文献[3]。

需要说明的是: 测量时需考虑最恶劣的色散信道, 包含正色散和负色散。其算法的思想是在当前的信噪比下模拟加入高斯噪声, 评估能加多大的噪声, 使符号误码率(SER)接近 4.8×10^{-4} 。

4 系统仿真设计

光通信系统的仿真性能评估以误码率(BER)为依据, 影响BER的因素主要: 信号质量、噪声、干扰。

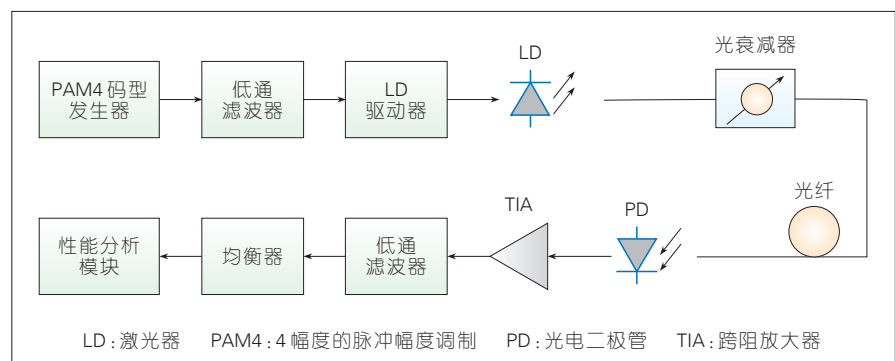
影响信号质量的因素主要包括带宽、线性度、抖动、消光比和OMA等。带宽小, 容易产生码间干扰, 可以通过频域补偿的方法缓解, 如: 预

加重和均衡技术; 考虑信号线性度时, 眼图中最小的一只眼决定了BER的性能; 信号抖动会造成判决位置的偏差, 从而影响BER性能; 消光比会影响功率预算, 进而影响灵敏度; 接收光信号的OMA, 即接收信号的调制强度, 当噪声不变时, 强度越大, BER越小。

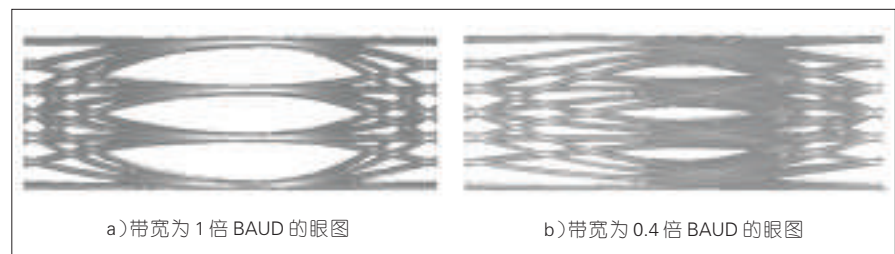
噪声主要包括光域噪声和电域噪声。在光域方面, 前文已有说明; 在电域方面, PD/APD的暗电流和噪声电流以及TIA的噪声基本上决定了接收机的灵敏度。

干扰主要包括多径干扰、色散、信道选择性衰落。多径干扰主要是由多个连接器来回反射后, 叠加到光信号上, 相当于噪声; 色散会使脉冲展宽, 带宽变小; 信道选择性衰落主要是较高频率选择衰落, 类似于低通滤波器。

收发系统的仿真框图如图5所示。与NRZ仿真系统相比, 其最大的不同点主要体现在发送侧的PAM4信号发生器和接收侧的性能分析模块(支持PAM4眼图分析)上, 其次是对驱动器和TIA有线性要求。



▲图5 光收发系统仿真框图



▲图6 不同带宽下的眼图

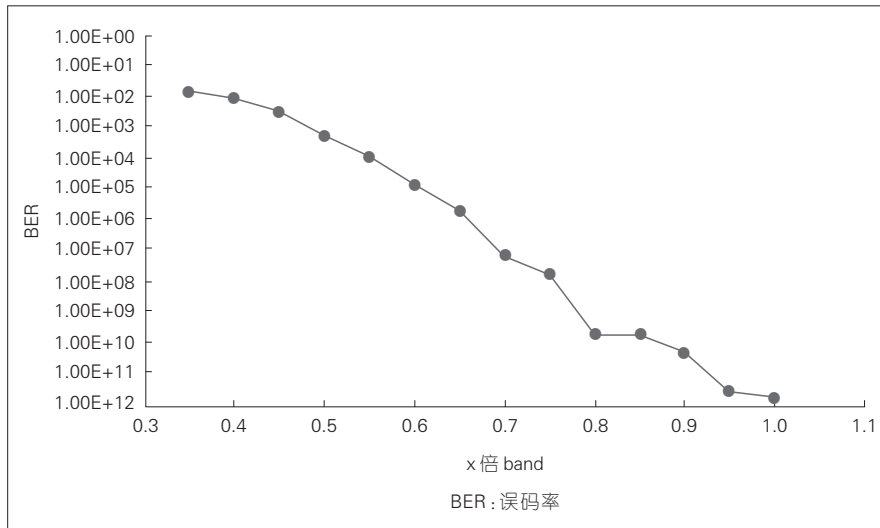
仿真可信性主要取决于链路器件仿真模型的准确度, 在实际仿真中需要结合测试来提升器件建模参数准确性。由于PAM4技术实际上没有大规模应用, 应用经验缺乏, 仿真可以指导系统设计及相关器件规格定义。以带宽仿真为例, 发送和接收的信号滤波器都选用二阶贝塞尔滤波器。带宽为1倍波特率(BAUD)时的眼图如图6a)所示, 眼图中的3个眼的眼皮很薄, BER很小。

图6b)为发送的滤波器带宽为0.4倍BAUD时的眼图, 眼图中眼皮很厚, 码间干扰较大, BER性能差。

图7的曲线图是在一定条件下的带宽与误码关系的曲线。从图7中可以看出: 当带宽逐渐地变大时, BER(log)值近似直线下降。

5 结束语

目前, 多个光模块标准采用了PAM4作为光调制方式; 但是相关产品没有进入规模部署, 特别是在电信应用场景中对光模块的可靠性及距离要求高。PAM4光通信系统设计需要全面考虑发送、接收及光路各



▲ 图7 带宽与BER关系的曲线图

种因素的影响,结合实际应用推进PAM4技术产业链成熟度,为5G承载网高速、可靠、规模部署做好准备。

参考文献

- [1] TX LINEARITY MEASUREMENT PROPOSAL [R/OL]. (2016-01-16) [2018-08-06]. http://www.ieee802.org/3/bs/public/16_01/hegde_3bs_03_0116.pdf
- [2] IEEE P802.3bs Baseline Summary: IEEE P802.3bs [S/OL]. (2015-07-15) [2018-08-06]. http://www.ieee802.org/3/bs/baseline_3bs_0715.pdf

3bs_0715.pdf

- [3] 400GbE using Nyquist PAM4 for 2km and 10km PMD[R/OL]. (2014-09-14) [2018-08-06]. http://grouper.ieee.org/groups/802/3/bs/public/14_09/rao_3bs_01b_0914.pdf
- [4] FEC Performance with PAM4 Precoding[R/OL]. (2015-07-15) [2018-00-00]. http://www.ieee802.org/3/bs/public/15_07/anslow_3bs_04_0715.pdf
- [5] BHOJA S, BLISS W, CHEN C, et al. Precoding Proposal for PAM4 Modulation[R/OL]. (2011-09-11) [2018-08-06]. http://ieee802.org/3/bj/public/sep11/parthasarathy_01_0911.pdf
- [6] ANSLOW P, CIENA. SSPRQ Test Pattern[R/OL]. (2016-04-16) [2018-08-06]. http://www.ieee802.org/3/bs/public/adhoc/smf/16_04_19/anslow_01_0416_smf.pdf

- [7] Draft Amendment to IEEE Std 802.3-2015: IEEE Std 802.3-2015 [S/OL]. http://www.ieee802.org/3/bs/public/17_03/king_3bs_01_0317.pdf
- [8] Keysight Technologies. How to Overcome Test Challenges in 400G/PAM-4 Designs[R/OL]. (2017-02-15) [2018-08-06]. https://www.keysight.com/upload/cmuc_upload/All/PAM-4_January2017_Final.pdf

作者简介



朱梅冬,中兴光电子技术有限公司系统工程师;从事高速新型光电器件及系统的研究;曾参与光纤故障监测及光纤传感等重要项目;申请发明专利5项。



陆建鑫,中兴光电子技术有限公司规划总监;作为光通信领域资深专家,多年来致力于宽带网络设备和器件的研发、系统设计及规划工作;参与多项政府重大项目;在ITU-T和中国光纤网络标准化领域提交提案10余篇,申请中国专利30余项、国际专利10余项。

数据中心的高速光互连技术

Optical Interconnecting Technology of Data Center

余建军/YU Jianjun¹
方凯博/FANG Kaibo²

(1. 中兴通讯股份有限公司美国分公司, 美国 新泽西 07960;
2. 复旦大学, 上海 200433)
(1. ZTE USA Inc, NJ 07960, USA;
2. Fudan University, Shanghai 200433, China)

随着物联网、虚拟现实和人工智能(AI)的涌现,互连网的发展已经到了一个新的阶段,其中大数据和云计算是2个最具有代表性的产物。作为信息资产,大数据正在越来越多的领域中体现出价值和重要性。云计算是与大数据密切相关的计算方式,通过这种方式,共享的软硬件资源和信息可以按需提供给计算机和其他设备,使得原来难以在单台计算机上处理的大数据能够得到充分挖掘和利用。作为云计算的核心支撑平台,数据中心的发展需求变得越来越迫切。现在的数据中心无论是数量还是性能,都远远不能满足当今社会的需求。绝大多数大数据的处理和计算都是在数据中心进行的。根据《Cisco全球云计算指数白皮书》,到2019年,全球通信流量的99%都是和数据中心相关的。其中,大部分数据通信依然集中在数据中心内部^[1-6]。

由于数据量的爆发和网络流量的迅速增长,数据中心正在从10 G/40 G朝25 G/100 G/400 G架构升级。

收稿日期: 2018-07-04
网络出版日期: 2018-08-02

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 04-0038-04

摘要: 介绍了数据中心的高速光互连技术的最新进展,重点关注新型调制和解调技术。为了降低成本,需要采用低带宽光电器件,高级QAM调制和直接检测将可能用于高速光互连技术中。同时介绍了中兴通讯近年来在这方面的研究进展,包括最先采用直接检测实现了4x128 Gbit/s信号传输距离超过300 km的实验。

关键词: 光互连; 调制格式; 直接检测; 相干检测

Abstract: In this paper, the recent progress on high-speed data center interconnection is summarized, and the modulation formats and detection schemes are introduced in detail. In order to reduce the bandwidth of the optical/electrical components, high-order quadrature amplitude modulation (QAM) modulation and direct detection will be employed in these high-speed systems. ZTE's recent research results on this area including a world record of 4x128 Gbit/s signal transmission over 300 km standard single model with direct detection are also introduced.

Keywords: optical interconnect; modulation format; direct detection; coherent detection

传统的电互连难以满足数据中心日益增长的传输带宽和传输速率的要求,这就为光互连带来了巨大的机遇。光传输具有大带宽和长距离传输的优点,它的主要应用场景是在两点之间提供大带宽的信息传输通道,所以在诞生之初,主要应用领域是长途干线网。在数据中心之间以及数据中心内部采用光互连,将极大地提升数据中心的数据处理和运算能力。在如今的数据中心网络中,几乎每个连接都采用了光互连技术,包括数据中心内部距离几米的服务器和交换机之间的连接^[5]。

而单纯只是数据中心数据流量的增长并不能让物联网真正受益,只有众多的数据中心之间形成互连互通才有可能造福于物联网下的数据传输。可扩展数据中心架构满足了

现代化超大规模数据中心架构东西向流量的增长,使得数据中心互连成为可能。大量的数据流量将利用光传输进入到数据中心,数据中心之间共享信息云端数据,使得光传输将不仅用于数据中心内部的数据传输,也将用于数据中心之间的互连。由此光传输在数据中心光互连市场上的规模将远远超过电信运营商。

1 数据中心内的光互连技术

对于数据中心内部互连来说,最理想的互连方式是每一台服务器都与所有的其他服务器相连接,这样一来应用层的软件就不需要与负责计算任务调度的中心机进行通信。然而,这样的网络结构将会极为复杂而且成本异常高昂。在实际中,数据中心采用的是拓扑分层结构,集群之间

的互连通过分组交换网络汇聚而成。并行光传输技术是数据中心内部通信的重要方式,这种传输方式不仅能够大大提高通信速率,而且结合了大规模网络架构中的并行数据通道结构,数据处理速度也有很大的提升。短距离的光连接通常采用垂直腔面发射激光器(VCSEL)。与其他类型的激光器相比,VCSEL具有低成本和低功耗的优势,容易实现电信号和光信号的速率匹配,而不需要昂贵的高功耗器件来进行数据速率转换。这种方式的缺点是:媒体传输协议(MTP)/多光纤连接跳线(MPO)光纤终端器件相对比较昂贵,而且需要带状光纤来实现和外部的互连。为了达到更高的传输速率,降低单位比特的传输成本,光集成电路(PIC)和波分复用(WDM)技术的应用逐渐成为主流。

为了满足数据中心持续增长的带宽需求,数据速率、器件功耗和空间密度都需要有大规模的提升。在未来的几年内,数据中心的光收发机速率将会提升4倍,而功耗和空间占用则保持不变。传统的二进制启闭键控(OOK)调制方式在VCSEL中可以达到20 Gbit/s或以上的速率。为了实现更高速率的传输,需要对光电器件的带宽和色散性能提出更高的要求,同时需要新的技术应用于短距离光连接中。这些新的技术包括色散补偿、低功耗集成硅光电路,以及新的并行多通道技术的演进。

并行通道技术包括多纤技术和多波长技术。在发射端,电信号经过驱动电路来对激光器阵列进行调制,产生并行多路光信号,然后这些光信号经过耦合后送入光纤中进行传输。在接收端,光信号通过光电探测器阵列转换为电信号,再由接收机电路对电信号进行恢复。一般来说,短距离100 Gbit/s的光互连可以采用了4 x 25 Gbit/s的并行通道,主要包括3种技术:短距离光模块(SR4)、4级脉幅调制(PSM4)和粗波分复用系统

(CWDM4)。其中SR4和CWDM4是多模传输技术,SR4应用于850 nm的VCSEL激光器阵列中,使用MPO多模光纤作为传输通道,包括8根双向多模光纤;PSM4同样使用8根双向光纤,但均为单模光纤,基于分布式反馈激光器(DFB)的PSM4系统传输距离可达500 m;CWDM4则使用4个不同的波长作为并行数据通道,同样基于DFB激光器和单模光纤,但传输距离可以达到2 km。这种方式减少了光纤的数量,降低了链路的成本;但对激光器的特性提出了更高的要求,且光收发机需要波分复用(WDM)复用器和解复用器。总体来说,光互连的成本包括光收发机的成本和光纤链路的成本。在以上的几种技术中,SR4具有最低的光收发机成本,但光纤链路的成本最高;CWDM4则将光纤链路的成本降到了最低,但光收发机成本最高。单模技术能够实现更远的传输距离,但光收发机比较昂贵;多模技术则能够使用成本低廉的收发机,但传输距离会受到限制。具体使用哪种技术需要综合考虑多种因素,除了性能和成本之外,空间大小、使用寿命以及对未来技术的兼容性都是非常重要的几个方面。

100 Gbit/s之后的下一个以太网速率很有可能是400 Gbit/s。IEEE 802.3在2014年启动了400 Gbit/s以太网研究组,定义400 Gbit/s以太网标准。400 Gbit/s以太网物理层对多模光纤以及单模光纤的距离目标和100 Gbit/s一样。有多种方法可以使光通道达到400 Gbit/s:一是可以增加通道速率,如提高符号速率或调制阶数,50 Gbaud的PAM4信号可以不改现有通道数就可以实现400 Gbit/s;二是增加光纤数,如在现有25 Gbit/s通道速率的基础上,采用16根光纤可以达到400 Gbit/s;三是增加波长,如在PSM4基础上,每根光纤4个波长就可以实现400 Gbit/s。不论采用哪种方法,400 Gbit/s的单位比特的成

本和功耗应该比100 Gbit/s的低。

2 调制和探测技术

先进的调制格式、数字信号处理算法(DSP)以及编码技术将会成为光通信网络下一步发展的趋势^[7-13]。然而,对于数据中心来说,由于面对的场所和需求有所不同,面临的工程问题与长距离光纤通信网络不一样,因此需要特殊的光互连解决方案。例如:数据中心的应用对于物理层的时延要求较高,通常少于100 ns,这就限制了前向纠错码(FEC)和DSP算法的应用;数据中心通常拥有数量庞大的高速率接口,因此要求光器件具有低能耗、小尺寸;在数据中心内部大量地部署光纤链路,则要求成本在可以接受的范围。所有这些因素的考虑都将会影响数据中心光互连技术的选择和应用。

对于光信号来说,可以进行数据调制的物理量有4个:强度、相位、频率和极化模式,在此基础上发展出来的调制方式主要有强度调制、正交幅度调制(QAM)以及极化复用的强度/相位调制^[13]。最简单的强度调制格式是二进制强度调制即OOK,每个传输符号携带1 bit信息。随着光器件的发展,高阶的强度调制格式已经应用于光通信中,如PAM中的PAM4、PAM8,部分响应PAM(PR-PAM)和离散多音调制(DMT)等,这些高阶的调制格式具有更高的频谱效率,每个符号可以携带更多信息,因此能够减小带宽的开销,适用于高速率的业务需求。QAM则是一种强度-相位联合调制格式,根据调制生成的星座点数可以分为正交相移键控(QPSK)、8-QAM、16-QAM、64-QAM等,目前已可实现高达1 024-QAM的调制^[12]。在高阶的QAM调制中,每个符号所包含的信息量远大于高阶强度调制格式,因此将有巨大的应用前景。另一种常用的强度-相位联合调制是无载波幅相调制(CAP),它是以QAM技术为基础发展起来的一种调制技术,主

要应用于短距离的高速数据接入系统中^[9]。

接收端的探测或检测技术是将光信号转换为电信号的技术,一般在接收端使用光电二极管(PD)来实现光电转换的过程^[7-13]。根据接收端是否使用本震光源与接收光信号进行拍频,可以将光检测技术分为直接检测和相干检测。直接检测仅仅对接收光信号的幅度信息进行检测,而相干检测能够将光信号携带的幅度和相位信息完整地恢复出来。

对于直接检测方案,相对应的调制格式为强度调制,因此形成强度调制/直接检测(IM/DD)的结构^[7]。图1是一种基于直接调制激光器(DML)的100 GE IM/DD光传输系统结构。IM/DD系统具有低成本、低功耗、小尺寸、结构简单等优点,易于集成在光模块中,对于短距离光通信是理想的选择。数据中心的城域网和内部互连主要采用的是直接检测方案,目前已经比较成熟。

相干检测的方案适用于所有的调制格式,而且能够对正交极化调制的信号进行解调,大大提高了频谱效率^[2]。由于使用本震光载波,接收机的灵敏度远远超过直接检测方案,能够实现远距离通信。更重要的是:可以对发送端和接收端的信号使用数字信号处理技术,对系统的线性和非线性损伤进行补偿,如色散补偿、信道预均衡和非线性补偿等,从而提升了系统性能。另外,在系统中使用复

杂的编解码技术成为可能,系统的容量可以接近香农极限。由于复杂的编解码技术成本较高,实现较为复杂,一般应用于长距离骨干通信网络中。数据中心的城域网使用相干检测技术能够大大延长通信距离,而且高阶调制格式的应用使得单位比特的传输成本得以降低。使用相干通信技术可以实现单载波400 Gbit/s的速率,是下一代以太网标准的重要候选方案^[7]。

3 相关研究进展

中兴通讯在高速DMT、PAM4以及无载波幅相调制(CAP)技术的直接检测和相干检测方面进行了多年的研究。采用DMT调制和直接检测,我们实现了创纪录的320 km标准单模光纤传输;采用镜像取消算法,我们实现产生了创纪录的300 Gbit/s DMT信号产生和直接检测;采用非线性补偿和多输入多输出(MIMO)算法,我们实现了200 Gbit/s DMT信号传输超过160 km。我们也系统地比较了112 Gbit/s的DMT、PAM4和CAP信号在器件带宽受限和不受限情况下的传输性能,结果显示:在光电器件带宽不受限的情况下它们的传输性能基本一致;但当带宽受限时,DMT性能略微好一些。我们采用先进的MIMO算法实现了CAP信号传输超过480 km的传输纪录。在高级QAM DMT信号产生和直接检测方面,我们采用~10 GHz的光电器件实

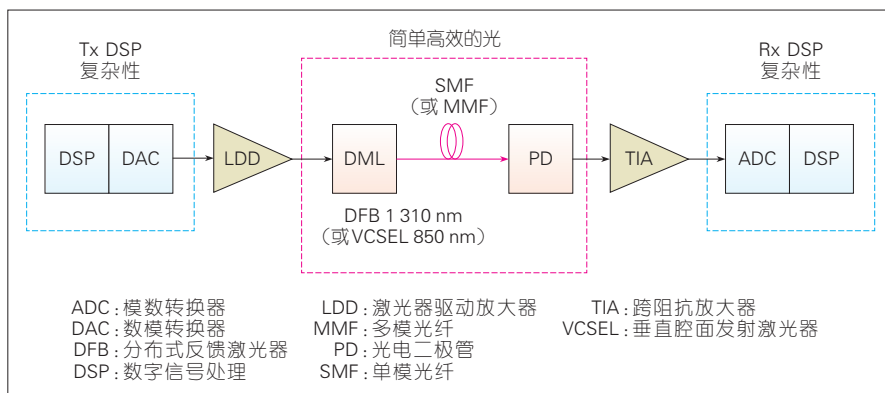
现了128 QAM 120 Gbit/s的DMT信号产生和直接检测,这是业界最先采用10 G器件实现100 G信号产生和直接检测,基于这个结果OFC2017组委会专门写了一个3页的新闻进行报道我们的进展。表1总结了最近数据中心光互连的创纪录结果。

4 未来展望

作为数据中心的关键因素,光模块具有广阔的发展前景。40 G到100 G的互连迫在眉睫,与此同时,超100 G的标准制定也进行得如火如荼,而且一些可行方案也随之提出。为确保这些方案能满足未来数据中心在成本和功率方面的需求,更多的光模块新理念是必须的。目前,生产制造光模块的成本上,封装成本和光电芯片成本占了整个光模块80%~90%的比例。使用开放光模块,可以很大程度上降低成本。另一方面,把光模块变成一个不与系统设备捆绑在一起的独立部件,可使数据中心客户能够选择一个最适合自己的互连方案,有利于找光模块厂家做定制化的特性,实现针对性的运维管理。

到了下一代100 G和400 G的网络,高速信号的实现变得越来越难。总体来说,在光纤链路中提升带宽的方式有2种:第1种是提高每个通道的比特速率,第2种是增加通道数。提升比特速率有2种方式:第1种是直接提升波特率;第2种是保持波特率不变,使用更高阶的调制编码格式。到了10 G以上的速率,由于色散和非线性的影响,提升波特率较为困难,因此,使用高阶调制编码格式成为首选方案。增加通道数的方式有增加波长通道和增加光纤通道,而这会带来成本的增加。

根据阿里巴巴在开放数据中心委员会(ODCC)2016年峰会上的报告,未来的100 G接入方案大概会有3代的演进过程:第1代即为目前阶段的100 GE以太网,为4×25 G实现方式;随着下一代IC芯片的发展,第



▲图1 一种基于直接调制激光器的100 GE光传输系统结构

▼表 1 数据中心光互连传输纪录

调制格式	传输速率/ (Gbit/s)	单、双极化	传输距离/ km	波长/nm	检测方式	单位
PAM/CAP/DMT	112	单极化	10	1 310	直接检测	香港理工
PAM	83.3	双极化	400	1 550	相干	贝尔实验室
PAM	100	双极化	0.1	1 550	直接检测	McGill 大学
PAM	140	单极化	20	1 310	直接检测	香港理工
PAM	112	单极化	1	1 550	直接检测	烽火
DMT	128	单极化	320	1 550	直接检测	ZTE
CAP	240	单极化	160	1 550	直接检测	ZTE
DMT	100	单极化	80	1 550	直接检测	华为
PAM/CAP/DMT	112	单极化	480	1 550	直接检测	ZTE

CAP: 无载波幅相调制 DMT: 离散多音调制 PAM: 脉幅调制

2代将会变成2×50 G的方式;到了第3代,将能够直接实现单通道100 G。

到400 G的解决方案,发展分为4代,通常来说光的速率提升比电快一点:1代现在已经有产品出现,就是用低功耗联盟接口8(CPF8)这样的光模块封装,电信号采用16×25 G,而光信号采用16×25 G和8×50 G的FR8和L8的方案。第2代电信号速率升级到50 G,采用8通道。光信号传输采用单模光纤的FR8和LOR8方案,电信号和光的速率完全配合上。第3代的电信号还是50 G,光可以提升到100 G,将有3种方案。第4代从电到光都提升到单通道100 G。为了实现单通道400 G甚至更高速率,相干探测技术将会有广泛的应用需求。目前光联网论坛(OIF)已经开始立项研究这一标准并命名它为400 ZR,估计这一立项内容很快成为标准。

参考文献

[1] LAM C F, LIU H, KOLEY B, et al. Fiber Optic Communication Technologies: What's

Needed for Datacenter Network Operations [J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(7). DOI: 10.1109/MCOM.2010.5496876

- [2] SCHUH K, BUCHALI F, IDLER W. Single Carrier 1.2 Tbit/s Transmission over 300 km with PM-64QAM at 100 GBaud [C]//Optical Fiber Communication Conference 2017. USA: OFC, 2017. DOI: 10.1364/OFC.2017.Th5B.5
- [3] 谢崇进. 数据中心光通信技术[J]. 电信科学, 2017, 32(5): 44-51
- [4] YUBOMIRSKY I, LING W. Advanced Modulation for Datacenter Interconnect[C]//Optical Fiber Communication Conference. USA: Optical Society of America, 2016
- [5] KACHRIS C, KANONAKIS K, TOMKOS I. Optical Interconnection Networks in Data Centers: Recent Trends and Future Challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(9): 39-45. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6588648
- [6] 张国颖,陈秀忠,吴庆伟,等. 云计算数据中心光互联技术及应用趋势[J]. 电信网技术, 2013, (12): 29-33
- [7] WANG Y, YU J, CHI N. Demonstration of 4 x128-Gb/s DFT-S OFDM Signal Transmission over 320-km SMF With IM/DD [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2): 1-9. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2545642
- [8] WANG Y, YU J, CHIEN H -C, et al. Transmission and Direct Detection of 300-Gbps DFT-S OFDM Signals Based on O-ISB Modulation with Joint Image-Cancellation and Nonlinearity-Mitigation[C]// ECOC 2016 - 42nd European Conference on Optical Communication. Deutschland: VDE,

2016:1-5

- [9] SHI J, ZHOU Y, XU Y, et al. 200-Gbps DFT-S OFDM Using DD-MZM-Based Twin-SSB with a MIMO-Volterra Equalizer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(14):1183-1186. DOI: 10.1109/LPT.2017.2702602
- [10] SHI J, ZHANG J, CHI N, et al. Comparison of 100G PAM-8, CAP-64 and DFT-S OFDM with a Bandwidth-Limited Direct-Detection receiver[J]. Optics Express, 2017, 25(26):32254-32262. DOI: 10.1364/OE.25.032254
- [11] SHI J, ZHANG J, ZHOU Y, et al. Transmission Performance Comparison for 100-Gb/s PAM-4, CAP-16, and DFT-S OFDM With Direct Detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(23): 5127-5133
- [12] SHI J, ZHANG J, LI X, et al. 112 Gb/s/λ CAP Signals Transmission over 480 km in IM-DD System[C]//Optical Fiber Communication Conference. USA: Optical Society of America, 2018: W1J. 5
- [13] LI F, CAO Z, LI X, et al. Demonstration of Four Channel CWDM 560 Gbit/s 128QAM-OFDM for Optical Inter-Connection[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). USA:IEEE, 2016: W4J. 2

作者简介



余建军,中兴通讯股份有限公司美国分公司北美光波所所长、高速光通信首席科学家;长期从事高速光通信技术的研究;入选美国 OSA Fellow,中国“千人计划”专家;发表论文600余篇,获美国授权专利70余项及中国授权专利10余项。



方凯博,复旦大学在读硕士生,从事数据中心光互连研究;发表论文2篇。

基于硅基集成的可重构微波光子前端

Reconfigurable Microwave Photonic Frontend Based on Silicon Photonics

霍元东/HUO Yuandong
于鸿晨/YU Hongchen
陈明华/CHEN Minghua

(清华大学, 北京 100084)
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

随着 5G 移动互联网逐步走向应用, 下一代移动互联网对微波前端提出了更高要求, 包括更高频点的采用、多波束指向和适用多种调制格式, 甚至要求实现多点无线资源协同。这主要体现在需要一种可以实现多波段、可重构和软件定义的微波前端, 且工作波段向微波毫米波段扩展。在这种发展态势下, 大频率覆盖范围的微波前端在下一代移动互联网、软件无线电和宽带泛在无线接入与感知等方面将有重要应用。

对频率范围从 1 GHz 到几十吉赫兹的微波信号进行处理是相当困难的, 甚至在机理上也是不现实的。这是因为 1 GHz 波段和 20 ~ 60 GHz 波段使用的电子元件是截然不同的, 很难实现跨多波段的可调谐与可重构的微波信号处理。同时, 射频前端的动态范围也是限制无线系统性能进一步提高的重要因素之一。受限于模拟信号处理所依托的电子器件的机理性限制, 在可预见的未来, 采用电子信号处理技术的射频前端很难实现频率从 1 GHz 到几十吉赫兹

收稿日期: 2018-06-17
网络出版日期: 2018-07-26

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 04-0042-004

摘要: 针对下一代无线通信网络需求提出了一种基于硅基集成的微波光子前端, 它可以实现多波段、可重构和软件定义的微波光子信号处理。设计并实现了一种微波光子前端芯片, 并初步测试了其性能, 它可以实现可调谐上下变频和微波信号处理功能。

关键词: 硅基集成; 微波光子; 射频前端

Abstract: On account of the next-generation wireless communication networks, a microwave photonic front end based on silicon integration is proposed. It has the advantages of broad operating bandwidth, reconfigurability and software-defining on microwave photonic signal processing. A microwave photonic frontends chip is proposed and its performance is preliminarily tested, which contains the signal processing units of the up/down-conversion, phase shifting and filtering.

Key words: silicon photonics; microwave photonic; radio frequency (RF) frontend

的微波信号处理。

微波光子技术是在光域上处理微波信号的前沿光电子技术, 它为解决以上技术难题提供了新的思路^[1]: 首先, 常用的 1 550 nm 光波长处 1 nm 带宽约 125 GHz, 已足以覆盖全波段微波波段, 从而实现全波段可调谐微波光子信号处理; 其次, 光波频率比微波频率高 3 ~ 4 量级, 利用光生微波技术较容易实现微波与毫米波信号; 再次, 光域上可以实现超低损耗的超宽带真时延, 有利于微波信号的相参处理; 最后, 微波光子技术其潜在的高线性特征有助于构建大动态范围的微波光子系统。因此, 基于微波光子技术, 微波光子前端可以在全波段范围内实现宽带、多波段可调谐与可重构信号处理, 且具有可预见大动态范围和抗电磁干扰等优势。但是, 目前的研究方案多基于分立器件实现, 器件尺寸大、鲁棒性差, 离实用

尚有一定的距离。另一方面, 随着光子集成技术的逐步成熟, 美国、中国等国的研究者各自在相关科研计划的支持下开始从事微波光子器件与功能模块的集成化研究^[2-6]。具有小体积、高可靠性与低成本的微波光子集成微系统是满足微波光子学实际应用的重要手段, 体现出微波光子学研究向这一新方向的聚集, 并将在未来 5G 和下一代移动互联网中扮演重要角色。

1 硅基集成微波光子前端功能架构

硅基集成的微波光子前端是采用光域多波段、广覆盖的微波模拟信号处理方法并基于硅基光子加工手段构成多波段、高线性与可重构的微波光子前端片上系统。

微波光子前端主要包括光源、电光调制器、高精度度光信号处理器以

及光电探测器。其中,除光源提供相干光波外,其他所有功能器件均将集成于绝缘衬底上的硅(SOI)芯片上构成微波光子前端片上系统。我们设计的基于硅基集成的微波光子前端芯片的结构功能框图如图1所示,其中紫色方框内即是项目要实现的硅基集成微波光子处理芯片,它将完成微波光子前端信号处理的所有功能,包括跨波段、可调谐微波光子信号处理,微波光子宽带上下变频,微波光子本振频率综合和相移控制。在图中上半部分为微波光子接收单元,其功能是可调谐接收跨波段的微波信号,并将其下变频为中频信号;下半部分为微波光子发射单元,它将电中频信号上变频为微波信号,作为微波光子前端的射频输出。下面将分别说明2个微波光子集成系统单元。

(1)微波光子信号接收端

输入的微波信号经过高速硅基光子相位调制器后转化为光域微波信号,然后由微环构成的微波光子无限冲激响应IIR处理器进行处理;该路光域微波信号再与另一路光子本振信号共同注入波导型光电平衡探测器,实现微波光子信号的下变频,得到的中频信号进入电处理模块

进行处理。由图1可知:集成单元包括光束分波、光相位调制、微环可调谐滤波、光束合波单元和平衡探测单元,它们一起构成了可调谐微波光子前端功能单元。利用光域信号处理大带宽的特性,微波光子前端处理跨多个微波波段的微波信号。本项目将实现2~40 GHz微波信号的可调谐光子处理,这就意味着该集成单元可以工作在S、C、X、Ku、K和Ka 6个波段,这是传统的微波前端很难实现的。

(2)微波光子信号发送端

该单元将由电处理模块产生的中频信号通过光相位调制器转换为光域微波信号,然后与另一路光子本振信号同时注入基于波导的波导型锗光电平衡探测器,实现中频信号的上变频,并作为微波光子前端的射频输出。同样,它可以实现S、C、X、Ku、K和Ka 6个波段可调谐微波信号的输出。

同时,我们还利用硅基波导的非线性构成片上光子频率综合功能单元,它由非线性硅基相位调制器与可调谐硅基光子滤波器构成,利用优化设计光子波导与工作电压,充分利用硅基光相位调制单元的非线性,实现

3阶以上的光子本振倍频。之后,通过硅基光子微环滤波器选出高阶分量作为光子本振,从而实现了光子频率综合功能,大大降低了电本振输入的调谐频谱范围。

最后,通过光子相位调制器,很容易通过控制微波光子的光相位来实现所发送微波信号或接收的中频信号的相位,为多天线微波系统和相控阵天线的相位参数控制提供更方便有效的手段。

2 硅基集成微波光子前端芯片制作与初步实验结果

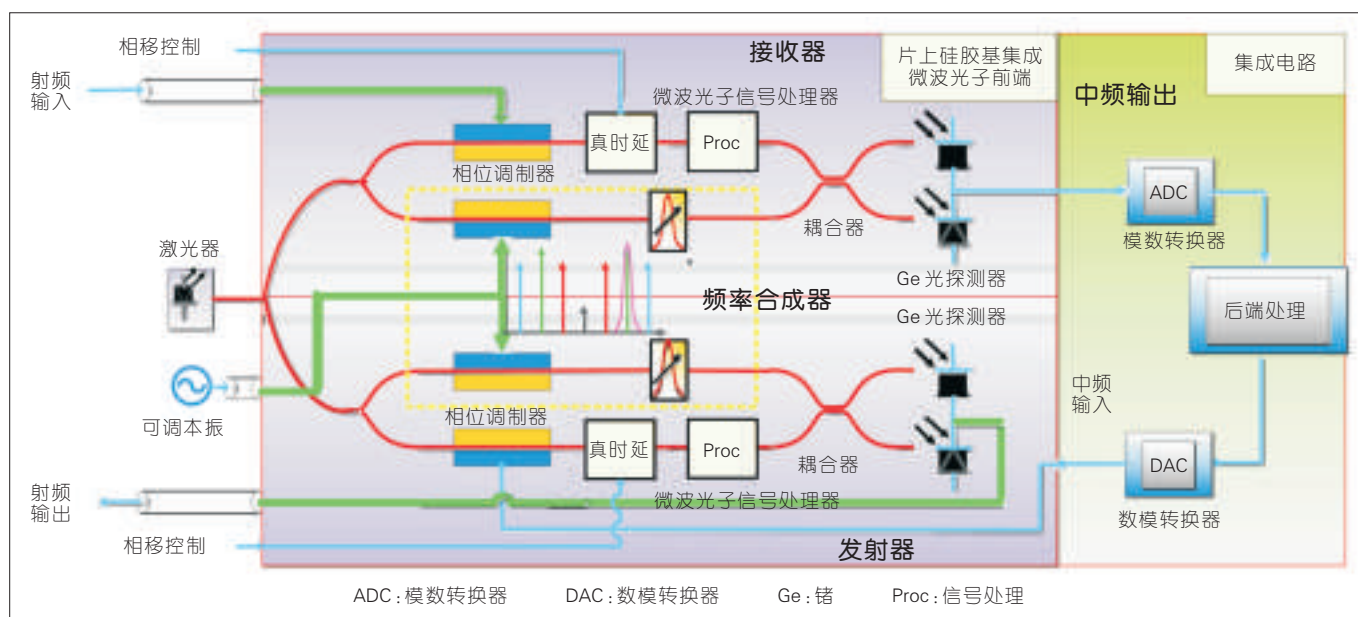
我们基于220 nm厚的SOI晶圆设计硅基集成微波光子前端芯片,并在微电子IMEC多项目晶圆代工平台进行加工,光路布版如图2所示,尺寸大小为2.5 mm×1 mm,其具体功能单元如下。

(1)硅基光波导

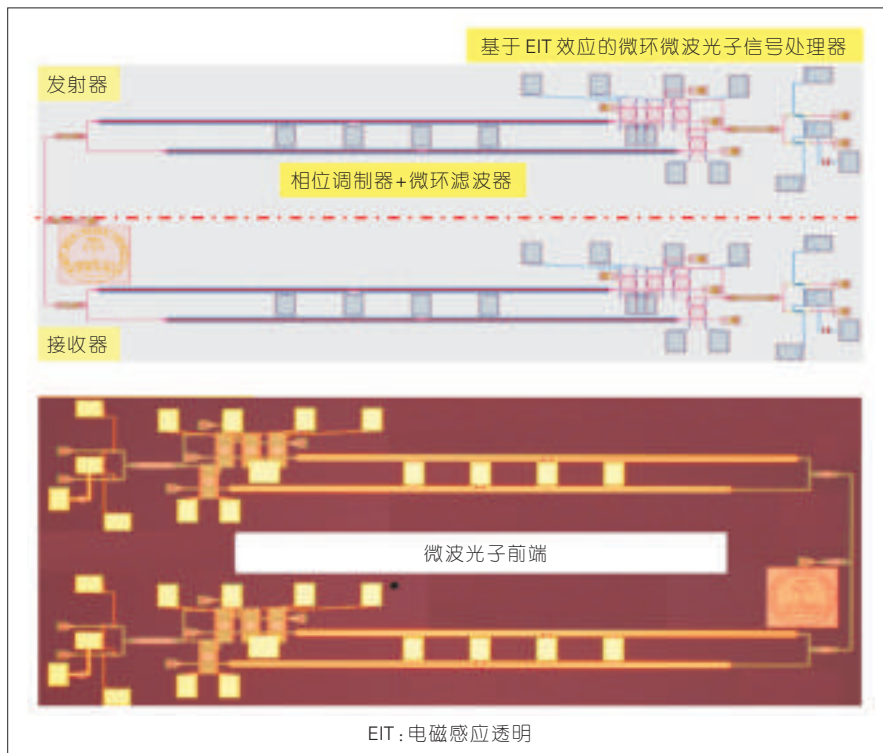
在该微波光子前端片上系统中,所有的连接波导均采用450 nm宽、220 nm厚的SOI单模波导,其弯曲半径可以小于5 μm。

(2)光纤耦合

我们采用垂直耦合方式实现光波的输入。垂直耦合可以通过光栅



▲ 图1 基于硅基集成的微波光子处理芯片及其构成的光子前端



▲图2 硅基集成微波光子前端芯片

耦合器实现,我们使用的垂直耦合器如图3 a)所示,其耦合损耗约4 dB。

(3) 光束合波/分波单元

在我们提出的微波光子前端片上系统中,采用5个合波/分波器,分别实现分光及相干合波功能。我们设计了基于多媒体接口(MMI)结构的分波合波器,其元件如图3 b),其分光比为50:50,插损小于0.5 dB。

(4) 光相位调制器

光相位调制器的结构单元如图3 c)所示。项目将采用电控硅基光子波导相位调制器来实现输入光波的相位调制。在光波导的两边注入P型和N型半导体,构成PN结。通过反偏,可以将波导分割为P区、I区和N区。我们通过调整PN结的偏压来调整I区的宽度,从而调整载流子的浓度,最终实现波导等效折射率的变化。受限于硅基光子波导结构,我们所使用的光相位调制器的带宽仅为10 GHz。

(5) 光微环滤波单元

光微环滤波单元如图3 d)与e)

所示。项目中采用微环谐振器作为微波光子滤波器。通过优化设计微环的结构参数,包括微环弯曲半径和耦合系数,得到合适特性的滤波器。

(6) 光探测单元

在微波光子前端片上系统中,我们采用2个锗硅波导平衡探测器及MMI分波器构成了锗平衡探测单元,用于实现微波光子信号的上下变频。我们对微波光子前端集成芯片

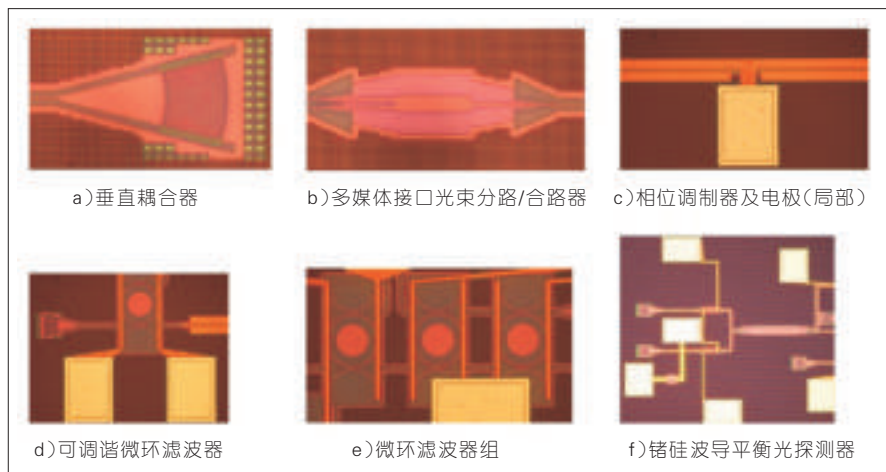
的发送与接收单元性能进行了测试。

在发送端,输入的中频信号通过硅光相位调制单元调制到光载波上,然后利用硅基微环滤波器将其中的1阶光边带滤出,再与另一路光本振信号进行混频。而此光本振信号也是由输入的电本振通过另一硅光相位调制单元调制到光载波上而生成的。利用硅光调制的非线性,我们通过设置不同的偏置电压得到1阶、2阶和3阶倍频的光本振分量。信号边带和光本振倍频输入锗平衡探测单元,从而实现上变频。通过调谐本振频率,我们可以得到调谐范围在2~10 GHz的光生微波信号。图4为1,2,3阶倍频本振与中频信号在锗平衡探测单元中实现的上变频增益。

在接收端,不同输入频率的微波信号与光本振混频,由此得到了下变频信号,也即中频信号。我们测试了系统在2~15 GHz频率范围内的无杂散动态范围(SFDR),如图5所示。测试中噪底功率约为-152 dBm/Hz。在图5 b)中,我们对比了1,2,3阶本振分量实现下变频时的系统无杂散动态范围。在系统中,SFDR主要受2方面影响:相位调制器的频率响应和高阶光本振分量的功率。

3 结束语

以5G为代表的下一代移动互联网对射频前端提出了新的要求。我



▲图3 硅基集成微波光子前端系统单元器件

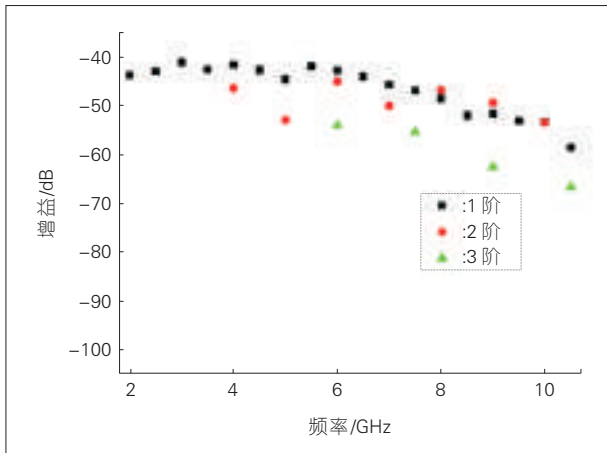


图4
微波光子前端芯片发送单元在不同频点的上变频增益

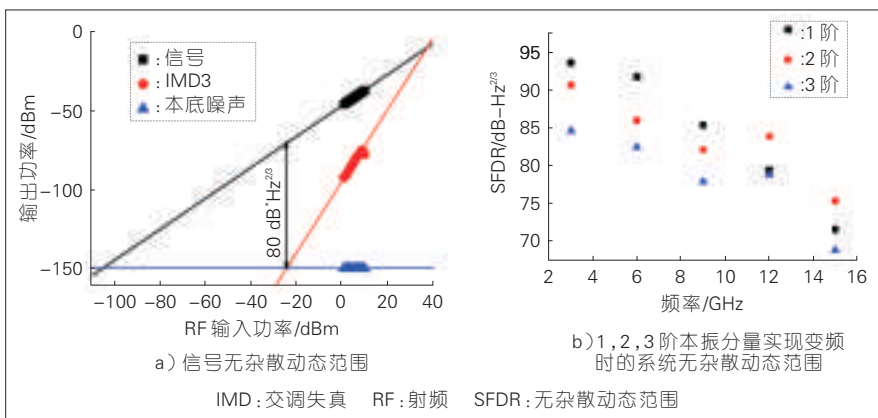


图5 微波光子前端芯片接收单元在不同频点的无杂散动态范围

们针对这一要求提出一种基于硅集成的微波光子前端片上系统,可以实现多波段、可重构和软件定义的微波光子信号处理。我们设计并实现了微波光子前端芯片,并初步测试了它的性能,可以实现可调谐上下变频和微波信号处理功能。

参考文献

- [1] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave Photonics Combines Two Worlds [J]. Nature

- Photonics, 2007, 1(6): 319–330. DOI: 10.1038/nphoton.2007.89
 [2] MCKINNEY J D. Technology: Photonics Illuminates the Future of Radar [J]. Nature, 2014, (507): 310–312. DOI: 10.1038/507310a
 [3] GHELFI P, LAGHEZZA F, BOGONI A, et al. A Fully Photonics-Based Coherent Radar System [J]. Nature, 2014, (507):341–345. DOI: 10.1038/nature13078
 [4] MARPAUNG D, ROELOFFZEN C, HEIDEMAN R, et al. Integrated Microwave Photonics [J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7:506–538. DOI: 10.1002/lpor.201200032
 [5] TU K Y, RASRAS M S, GILL D M, et al. Silicon

RF-Photonic Filter and Down-Converter [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28 (20): 3019–3028. DOI: 10.1109/JLT.2010.2072952

- [6] CHEN M H, YU H C, WANG J J. Silicon Photonics-Based Signal Processing for Microwave Photonic Frontends [M]. Silicon Photonics III. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2016

作者简介



霍元东,清华大学电子工程系信息光子研究所在读博士研究生;主要研究方向为硅基微波光子学,硅基集成片上信号处理。



于鸿晨,清华大学电子工程系信息光子研究所在读博士研究生;主要研究方向为集成微波光子技术。



陈明华,清华大学电子工程系长聘教授、博士生导师,曾任信息光子研究所副所长,2009–2010年为麻省理工学院电子学研究所访问教授;主要研究方向为微波光子学、光通信与光网络及其关键集成光电子器件技术;承担和参加了多项国家自然科学基金重点与重大项目、“973”项目、高技术“863”等科研项目,其中“大容量超长距光通信”项目获国家科技进步奖二等奖1项,部级科技进步奖5项;发表论文100余篇,多次在CLEO等国际学术会议上做邀请报告。

高速光器件封装技术发展趋势

Development Trend of High-Speed Optical Device Packaging Technology

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 04-0046-005

张一鸣/ZHANG Yiming^{1,2}

刘宇/LIU Yu^{1,2}

张志珂/ZHANG Zhike³

(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;

3. 北京大学, 北京 100871)

(1. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Peking University, Beijing 100871, China)

摘要: 针对5G应用场景, 高速光模块起着重要的作用, 其设计、制备和封装受多方面的因素限制。就封装这一因素对光模块高频特性的影响进行了详细分析, 并提出了3种不同维度的设计方案。基于此, 针对性地开发了3种符合应用标准的高速光模块。认为在未来大规模、高密度、高速率光电集成器件中, 封装技术将会朝着多维度、多形态的方向发展。

关键词: 三维封装; 高速直调激光器; 单片集成外调激光器; 多波长激光器

Abstract: High-speed optical module plays an important role in 5G application scene, and its design, fabrication and packaging are affected by many factors. In this paper, the influence of high-frequency characteristics of the optical module induced by packaging is analyzed in detail, and three different dimensions of the design scheme are proposed. Then three kinds of high-speed optical modules conforming to the application standard have been developed. It is considered that in the future, the packaging technology will be developed in the direction of multi-dimension and multi-form in the large scale, high density and high rate optoelectronic integrated devices.

Keywords: three-dimension packaging; high-speed directly modulated laser; monolithic integrated electro-absorption modulated laser; multi-wavelength laser

1 面向5G的光模块需求及挑战

1.1 光电模块的需求

随着物联网、大数据和云计算技术的飞速发展, 信息交互所需要的数据通信量呈现出爆炸式增长, 应运而生的光纤通信技术随之成为能够实现高速信息传输的首选技术。其中, 作为支撑光学通信发展的基础部件——半导体激光器, 其结构与性能也在不断被优化, 以满足现代通信需求。相比于4G, 5G的基站发生变化, 从4G的射频拉远单元(BBU)、基带处理单元(RRU)两级结构演进到5G的集中单元(CU)、分布单元(DU)和有源天线处理单元(AAU)三级结构, 进而衍生出前传、中传和回传3个网络。5G的概念提出后, 对光模块的需求大幅度增加, 这个需求主要体现在2个方面: 一是对光模块数量的需求, 除了传统前传

和回传网络中需要的光模块之外, 在中传的环节, 也即CU和DU连接的中传环节, 也需要增加新的光模块; 二是对光模块速率的需求, 4G前传主要是6G光模块, 后逐步升级到10G光模块, 回传在4G初期采用GE, 后逐步升级到10G, 而5G通信中仅5G前传就需要25G/50G光模块数千万只, 回传速率则更高, 需要100G的光模块, 回传的汇聚层将会升级到200G或400G^[1]。

1.2 光电芯片封装的挑战

据工信部表示: 5G系统将于2020年实现商业化, 在制定标准的进程中, 25G/100G光模块标准得到大多数运营商的肯定。研究者们不断改

良半导体材料的特性, 研制满足速率标准的、更集成化、更小型化的半导体光模块, 大幅度提高了数字信号和模拟信号的传输质量。

高速光模块的开发需要经过3个流程: 芯片设计与制造、高频电极和电路设计、光电子器件封装和测试。过去, 人们一直认为提高高频响应特性的关键在于芯片的设计与制作, 这其实忽视了封装设计的重要性。然而封装作为模块实用化的最后一步, 也是关键的一步, 对器件能够实现良好的高频响应有着至关重要的意义, 失败的封装设计将会导致器件的性能大大降低, 甚至不能使用, 使前期制作功亏一篑。如今, 模块的微波封装测试技术作为微波光子学领域

的重要研究课题之一,已经成为研究者们争相开发的新技术。目前为止,关于封装完备的光电模块在各大期刊上都有详尽描述。早期 EBBERG A 等人于 2000 年报道了一种采用 TO 封装形式无制冷的多量子阱直调激光器,传输速率达到 10 Gbit/s^[3]。次年,OKAYASU M 等人报道了蝶形封装的直调激光器模块,3 dB 带宽已达到 15 GHz^[4]。2015 年,中科院半导体所报道了一种蝶形封装的高速窄线宽激光器模块,3 dB 带宽达到 30 GHz,同时线宽只有 130 kHz^[4]。随后,他们通过对封装结构的改善,将直调激光器模块的带宽提高到 32 GHz^[5]。这些产品已满足 5G 应用中 25 G 光模块的需求,只是还不能进行大批量的工业生产,因为还需要在操作稳定性、工艺重复性等方面进行优化。而对于 5G 应用中 100 G 光模块的要求来说,单个激光器已无法满足这么高的传输速率,于是多波长直调激光器阵列 (MLA) 应运而生。目前,100 G 光模块的实现主要是利用 4 个波长的直调激光器芯片,每个芯片数字带宽达到 25 Gbit/s,大大减轻了单波长的压力。早在 1987 年,就出现了多波长激光器芯片的报导,OKNDA H 等人使用四分之一波长移位结构,实现一个 5 通道 1.3 μm 分布式反馈激光器 (DFB) 阵列^[6],单通道调制带宽超过 4 GHz。1990 年,NEC 的 YAMAGUCHI M 等人采用了半绝缘的掩埋异质结构实现了 1.5 μm 波段 4×2.5 Gbit/s 激光器阵列^[7]。2008 年,1 550 nm 波长下单片集成 4×25 Gbit/s 的 DBR 激光器阵列问世,该芯片满足 100 Gbit/s 以太网传输的需求^[8]。之后,第 1 个小型化 1 310 nm 波长的 100 Gbit/s (4×25.8 Gbit/s) 光发射模块 (TOSA) 也随即问世^[9]。在 2014 年,电子电信研究院 KWON O K 研究团队制作出混合集成 100 Gbit/s (10×10 Gbit/s) 直调激光器阵列,但未进行封装,只是将整体固定在可散热的钨铜衬底上^[10]。单管光模块的封装已经具备良好的

基础了,但是多通道光模块封装技术的发展还比较缓慢,存在电串扰大、光耦合效率低、装配工艺精度低、模块体积大等问题。因此在 5G 应用中,更高速单管光模块封装和多通道光模块封装是研究的重点。

对于单个器件和阵列器件的封装,应考虑以下几个方面:

(1) 如何设计高效的光耦合系统以及控温系统;

(2) 单管器件向高速率大带宽发展时,如何利用封装带来的寄生效应补偿芯片的不足;

(3) 阵列器件向小型化、集成化发展时,如何实现在有限空间内完成多路微波信号的馈入,以及完成结构变换、模场匹配等复杂的结构设计。

2 25 G/100 G 光模块封装的关键技术

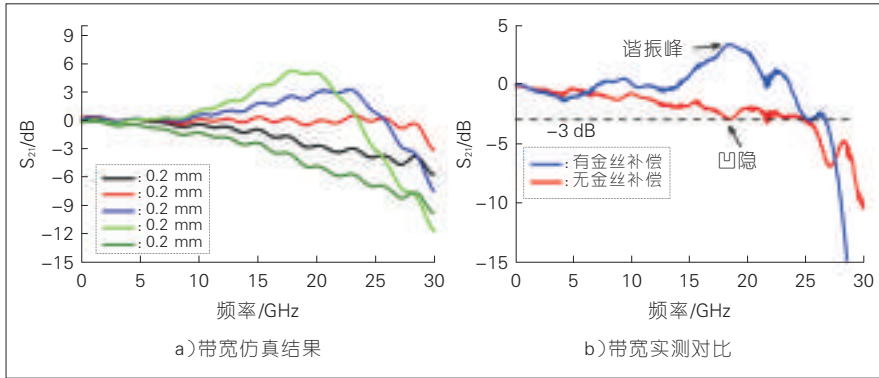
2.1 高速光模块的一维封装技术

仅从器件结构优化这一角度来说,半导体激光器芯片的最大调制带宽能够达到 40 GHz。这对于 5G 场景应用中所需的 25 GHz 光模块是足够的,那么对于拥有大带宽的芯片来说,封装成为限制器件整体带宽的主要因素。通常,完整的封装设计包括电、热、光、机械设计。在进行封装设计时主要从如何完整的传输微波信号,如何控制芯片工作时的温度状态,如何高效率地进行光电转换以及如何保证器件的高可靠性这几个方面进行考虑。对于单管激光器来说,光耦合、控温系统以及机械设计已经是成熟的技术,只有影响器件带宽性能的高频微带电路是一直在不断优化改进的,接下来我们主要对电连接中高频微带电路设计作重点分析。

一般使用微带线、共面波导以及接地共面波导这几种传输线结构实现电连接,主要完成信号馈入、信号传递等功能,需要注意的是:不同传输线结构之间还存在特征阻抗变换和微波模式匹配的问题。电极间的

连接常用金丝键合的方式,但是金丝键合会带来电寄生效应^[11]。以往认为电寄生效应只会恶化电网络的传输响应,但是经研究发现:金丝引入的电感和电极焊盘带来的电容会产生谐振,该谐振构成低通型网络,出现类似于滤波器的频率响应特性,利用这一特性可以扩展其截止频率,对光电子器件响应特性进行补偿,从而提高器件的高频响应特性。因此,我们利用先进系统设计 (ADS) 仿真软件建立激光器等效电路模型,模型包括封装网络和本征芯片 2 部分。通过调节封装网络部分的电路模型,得到的模拟电路响应能够对实际封装给予指导意义。当金丝长度为 0 时,即没有补偿时,器件的响应曲线可以认为是器件的真实响应。随着金丝长度的增加,传输响应曲线逐渐抬升,带宽也在增加。这意味着金丝引起的谐振效应补偿了器件在高频处衰落的响应。当金丝长度增加到某一值时,该效应达到饱和,此时激光器带宽达到了最大值,并且带内平坦度良好。而当金丝长度继续增加时,金丝引起的谐振对器件高频处的衰落的补偿不一致,导致带宽逐渐下降,谐振峰很高。仿真结果如图 1 所示,在实际封装中,我们将金丝长度设置为 0.6 mm,得到与仿真一致的实测图。尽管激光器的小信号频响扩大了,但是如果观察激光器的相频特性,会发现在谐振频率处线性度会很差,通常这不利于高速数据的调制传输。对于通信系统而言,幅频特性和相频特性一样重要,相频特性不好,会导致相位信息丢失,在复杂的高阶调制中缺少一个维度的调制空间。因此,在带宽和平坦度之间我们需要找到平衡点,通过控制金丝的长度以满足不同的应用场景。

在此仿真理论指导下,中科院半导体所报道了一种封装结构,如图 2 所示。在这种封装结构中,芯片 n 极直接贴装在信号线上,p 极通过金丝与旁边的地线相连,金丝的长度可



▲图1 金丝寄生效应的仿真与实测图

控。并且,在转折处采用了扫掠弯头以确保阻抗和宽度的连续性。另外,为了将同轴接头转化为平面结构,研究者引入了一段过渡传输线,以保证电磁场的模场匹配。再结合等效电路,优化了直流偏置电路。这种封装方案提高了注入效率,降低了功耗,有效补偿了高频衰落,增大了带宽。最终封装后的该模块经测试,带宽达到了30 GHz。

2.2 100 G 混合集成二维封装技术

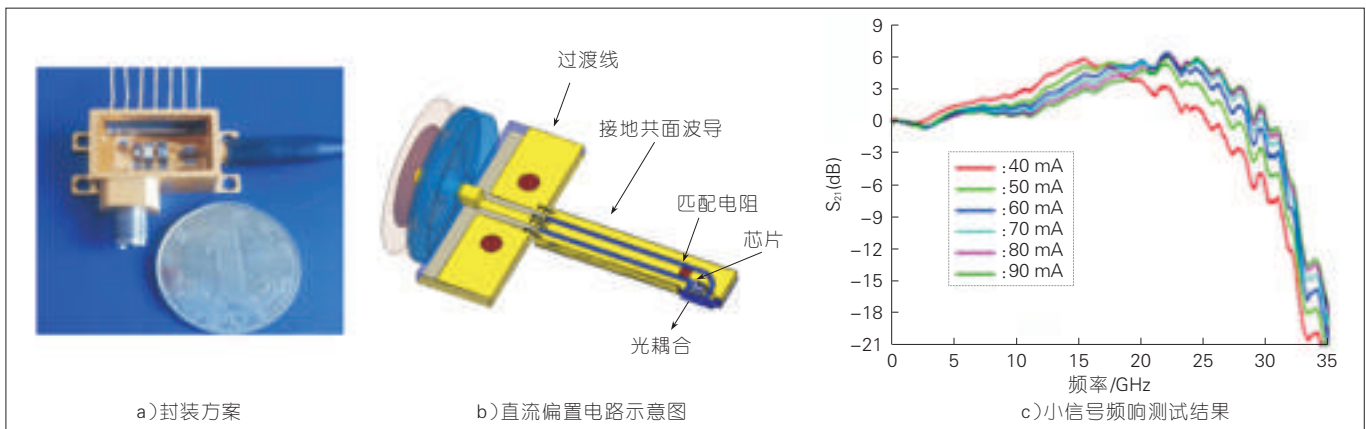
二维封装主要是针对阵列器件。目前100 G以太网中,受限单波长激光器的带宽,多波长激光器的提出与研究尤为必要,起初采用的方案是10×10 Gbit/s,通道数较多使得控制复杂,功耗也大。后来随着单管激光器带宽的提升,采用4×25 Gbit/s的方案成为更加可行的方案。

阵列器件的封装主要考虑的就

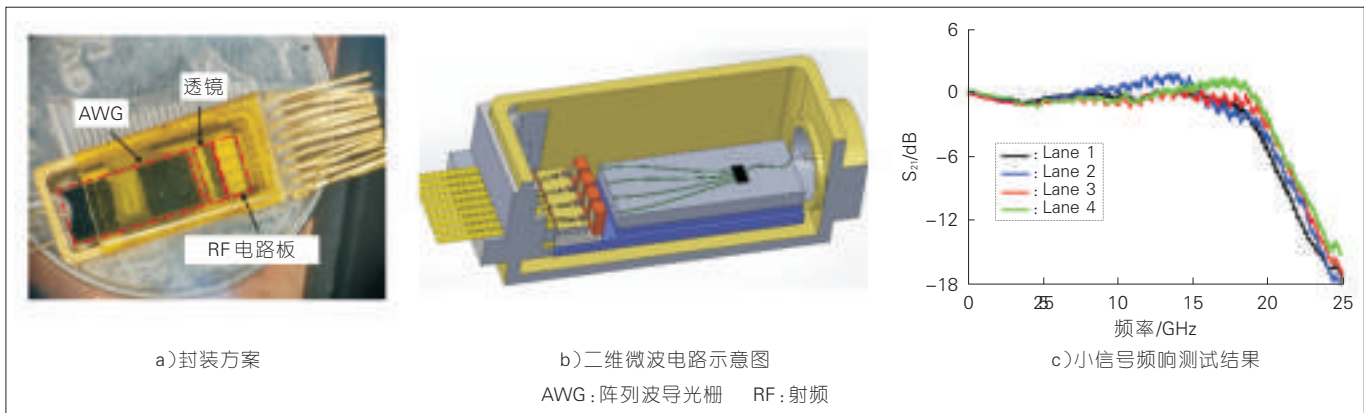
是多路信号的输入输出以及信号间串扰问题。以多波长激光器为例,管壳和微波电路设计都明显与单个激光器不同,多波长激光器的管壳除了起支撑、导热的作用外,还要完成多路微波信号的同时馈入。在单波长激光器封装中,仅使用单个高频连接器就可以实现这部分功能,比如标准的2.92 mm接头、1.85 mm接头、GPO接头、GPP0接头,但是在多通道阵列的封装中,这些连接器都因体积上的原因,无法被用于多通道射频的馈入。尤其对一个标准微尺寸的管壳而言,宽度只有4~5 mm,因此采用多层的陶瓷基板和地-信号-地共面波导电极引脚阵列来作为信号馈入的通道是一种可行的方法。中科院半导体研究所在2018年使用这种管壳,结合表面贴装技术,制作出了一种4×25 Gbit/s的发射模块。该结构的设计省去了常用于板级互连的印

制软带传输线,克服了管壳内外电路的高度差,射频和直流信号分开可控,并且该模块还可以方便地与外部控制电路PCB板集成在一起。除此之外,微波电路的设计也尤为重要,多路射频信号的排布以及结构变换都需要在有限的管壳空间内实现。该研究小组设计的4×25 Gbit/s的发射模块采用抗干扰能力强的接地共面波导传输线作为高频信号传输介质,并结合侧面金属化以及过孔设计实现上表面地电极与下表面地平面的连接,形成一个整体的“共地”结构,实现了良好的接地和屏蔽效果,改善了信号的完整性,有助于降低信号线之间的电串扰。对该电路结构测试的结果显示:相邻通道之间的串扰在30 GHz范围内均低于-22 dB。

该四通道阵列芯片经过上述的封装设计及工艺,实现了能够满足100 G-4 WDM-10标准的超紧凑,低功耗的多波长激光器模块^[2],如图3所示。管壳体积只有11.5 mm×5.4 mm×5.4 mm。内部包括4个波长间隔20 nm的直调激光器模块、四通道微波电路、4个聚焦透镜,以及带有LC光口的粗波分复用复用器。对该模块进行特性测试,得到测试结果为:4个通道的3 dB频率响应均在20 GHz左右;但是由于在芯片和合波器间没有足够的空间安置隔离器,使得光束在传输过程中产生了各种反射,这些反射最终会进入到激光器芯片有源腔,



▲图2 针对单管直调激光器的封装方案与测试结果



▲图3 针对4通道直调激光器的封装方案与测试结果

干扰载流子的流动,在带宽曲线上呈现出振荡现象。在光纤通信中,载流子的涨落会带来相对强度噪声,信号质量恶化、眼图闭合、误码率升高等现象。因此在实际光纤传输中,为了降低光反射对信号的影响,往往需要使用分立的光纤隔离器。目前,市面上一般将隔离器集成在LC光接口里,但这样会增加光接口的长度,而这很难应用到大规模高集成度的光电子芯片中。因此研究片上波导隔离器是十分有必要的。

2.3 100 G单片集成三维封装技术

三维封装是继二维封装之后提出来的新概念,目的是为解决更加小型化的集成芯片的封装问题,尤其是针对单片集成芯片的耦合封装。单片集成的光子芯片上功能元件众多,动辄几十个到几百个分立的功能部

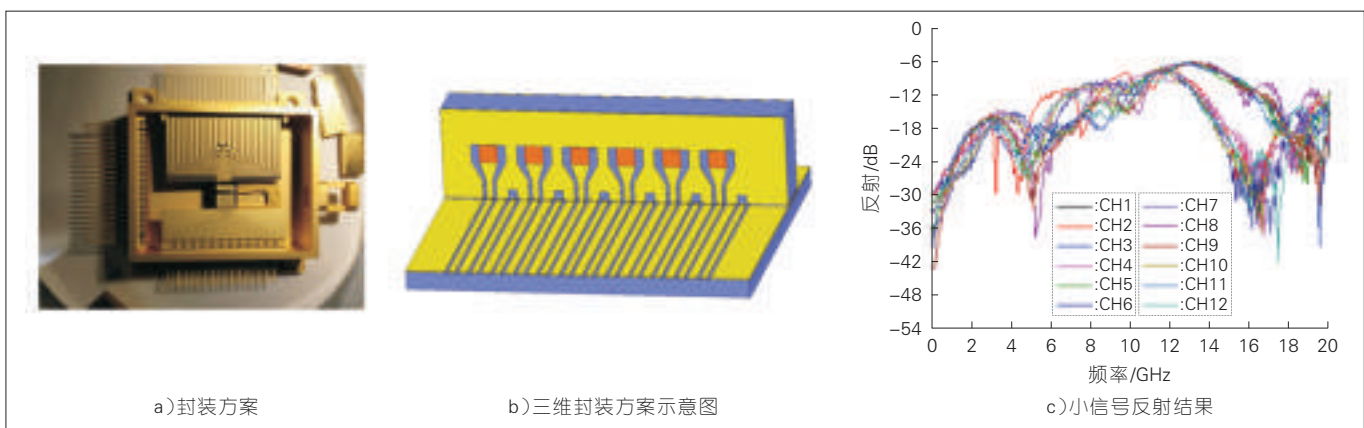
分;而集成芯片本身尺寸仅在百微米到几个毫米的量级,并行芯片间隔非常小;每个功能元件有时又不止一个电极,电极排布极其紧凑,电极功能也是多种多样。以多通道电吸收调制激光器阵列模块为例,激光器需要为其提供偏置电流的电极,调制器需要为其提供工作电压和调制加载的电极,器件的调谐电阻需要为其提供控制电流的电极;就整体模块化封装而言,还需要温度传感与控制系统的若干电极。数量繁多的电极引出键合引线十分密集,极易引起信道间的串扰。高频传输线的布局也是一个难点,布线的时候不如分立芯片灵活,极有可能出现长度多变,多种结构相互转换的情况。传输线过长容易产生谐振,电极弯曲会造成一定的场辐射,电极之间的互连也必然存在模场失配和阻抗失配的问题。以

上的因素都将导致高频微波信号的损耗和串扰,恶化激光器阵列模块的性能,需要在设计时加以重点考虑。

为了解决单片集成芯片的封装问题,中科院半导体所在2014年提出三维封装概念并完成了一款12通道电吸收调制激光器阵列^[3]。创造性地设计了三维匹配电阻阵列结构,再结合底面传输线阵列、采用植球技术,形成良好的立体式机械过渡与电学连接,如图4所示。经测试,匹配电路单元在20 GHz范围内,反射 S_{11} 在-10 dB以下;在40 GHz的范围内,反射系数 S_{11} 均在-6 dB以下,阻抗匹配状况良好且一致性好。对该封装结构进行管芯级测试,预计可以满足每通道10 GHz的多通道并行传输。

3 结束语

5G时代的开启将极大刺激光模



▲图4 针对12通道电吸收调制器的封装方案及测试结果

块产业的需求,在现有的封装工艺和基础上,研制出高带宽的单管激光器模块以及超小型高集成度的阵列激光器模块是科研界和产业圈都亟待解决的问题。本文中,我们回顾了芯片封装的发展历程,指出了芯片封装的发展方向,从针对单管芯片的一维封装发展到针对阵列芯片的二维、三维封装,结合芯片结构以及指标需求来合理制定具体的封装方案。我们预计:随着倒装焊技术的成熟,未来的封装形式将结合倒装焊技术和多维度封装技术,进一步降低封装引入的寄生效应,扩大工艺操作的冗余度,压缩封装的成本。目前针对5G应用中大量部署的25 G、100 G光模块,国家还需要不断提高科研水平以及完善科研成果到产业链的平滑过渡,完成最终5G通信的大规模部署,满足前传、中传、后传网络不同应用场景下不同程度光接口的业务需求。

参考文献

- [1] 祝宁华. 光电子器件微波封装和测试[M]. 北京:科学出版社, 2009
- [2] EBBERG A, AURACHER E, BORCHERT B, et al. 10 Gbit/s Transmission Using Directly Modulated Uncooled MQW Ridge Waveguide DFB Lasers in TO Package[J]. Electronics Letters, 2000, 36(17): 1476–1477. DOI: 10.1049/el:20001077
- [3] OKAYASU M, ISHIHARA N, TOHNO S. 10 Gbit/s 1.3 μm DFB-LD Module in 0.5 cc Ceramic Package for LAN/MAN Applications [J]. Electronics Letters, 2001, 37(5):303–304
- [4] LIU Y, ZHANG Z, LIU J, et al. 30-GHz Directly Modulation DFB Laser with Narrow Linewidth[C]// Asia Communications and Photonics Conference, 2015. DOI: 10.1364/ACPC.2015.AM1B.3
- [5] ZHANG Z, LIU Y, BAI J, et al. Ultra-Wideband Butterfly Directly Modulated Semiconductor Lasers [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1503309. DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2703846
- [6] OKUDA H, HIRAYAMA Y, FURUYAMA H, et al. Five-Wavelength Integrated DFB Laser Arrays with Quarter-Wave-Shifted Structures[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 23: 843–848
- [7] YAMAGUCHI M, SASAKI T, ASANO H, et al. Semiconductor Photonic Integrated Circuit for High-Density WDM Light Source[C]// 12th IEEE International Conference on Semiconductor Laser. USA: IEEE, 2002:160–161. DOI: 10.1109/ISLC.1990.764471
- [8] MASTUO S, KAKISUKA T, SEGAWA T, et al. 4 \times 25 Gb/s Frequency-Modulated DBR Laser Array for 100-GbE 40-km Reach Application [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(7): 1494–1496. DOI: 10.1109/LPT.2008.927896
- [9] KANAZAWA S, KOBAYASHI W, UEDA Y, et al. 30-km Error-Free Transmission of Directly Modulated DFB Laser Array Transmitter Optical Sub-Assembly for 100-Gb Application[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, (34): 3646–3652. DOI: 10.1109/JLT.2016.2520942
- [10] KWON K, HAN Y T, LEEM Y A, et al. A (10 times 10) -Gb/s DFB-LD Array Integrated With PLC-Based AWG for 100-Gb/s Transmission [J]. Photonics Technology Letters IEEE, 2014, 26:2177–2180
- [11] ZHU N H, LIU Y, ZHANG S J, et al. Bonding-Wire Compensation Effect on the Packaging Parasitics of Optoelectronic Devices[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2006, 48 (1): 76–79. DOI:10.1002/mop.21266
- [12] ZHANG Z, LIU Y, AN J, et al. 112 Gbit/s Transmitter Optical Subassembly Based on Hybrid Integrated Directly Modulated Lasers [C]//Chinese Optics Letters, 2018, 16: 062501
- [13] ZHANG Z, LIU Y, WANG J, et al. Three-Dimensional Package Design for Electro-Absorption Modulation Laser Array[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2):1–12. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2540360

作者简介



张一鸣,中国科学院半导体研究所在读博士;主要研究领域为高速光电子器件集成开发及系统应用;先后参与多个自然科学基金和科技部“863”等国家科研项目;在2017CIOPI国际会议上完成邀请报告;已发表论文5篇。



刘宇,中国科学院半导体研究所博士生导师;主要研究领域为高速光电子器件的微波测试、封装设计以及高速光模块的关键技术研究,具体包括通信用激光器、探测器、调制器及集成器件的测试和封装,高速光通信用收发模块及ROF器件的研发;主持了多项自然科学基金、“863”课题等科研项目,发表论文30余篇,申请发明专利10余项。



张志珂,北京大学博士后;主要研究领域为高速光电子器件的微波封装设计,光通信系统以及硅基集成芯片设计与研究;先后参与多个自然科学基金和科技部“863”等国家科研项目;在ACP、ICOON等国际会议上完成学术报告;已发表论文20余篇。

5G 无线光模块的需求分析和关键技术

Product Definition and Enabling Technologies for 5G Wireless Transceiver

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 04-0051-003

摘要: 25 G BiDi 光模块、50 G 的 4 级脉幅调制(PAM4)光模块、低成本相干 100 G 光模块是 5G 前传、中传、回传网络对光模块需求的几个典型代表。低成本是产业链对 5G 无线光模块的主要诉求点,规格分级、产业链共享、技术创新、国产化替代是实现低成本几个主要手段。5G 无线光模块的关键技术主要体现在光电子芯片层面,功能的扩展、速率的提升、成本的下降是光电子芯片技术创新的主要抓手。

关键词: 5G 无线光模块;光电子芯片;低成本

Abstract: 25 G BiDi, 50 G 4-level pulse amplitude modulation (PAM4), and low-cost coherent 100 G are the typical examples of the transceivers demanded by the 5G wireless front-haul, middle-haul, back-haul networks. Low cost is the primary requirement for the 5G wireless transceiver. Specification classification, utilization of the off-the-shelf components, technology innovations, and made-in-China components are the main means to achieve low cost. The key technologies of the 5G wireless transceiver are all about the optoelectronic chips, and the innovation in optoelectronic chips can be carried by the extension of the functionality, the upgrade of the bandwidth, and the low-cost approach.

Key words: 5G wireless transceiver; optoelectronic chip; low cost

张华/ZHANG Hua
黄卫平/HUANG Weiping

(青岛海信宽带多媒体技术有限公司,
山东青岛 266000)
(Hisense Broadband Multimedia
Technologies, Ltd., Qingdao 266000, China)

几个有代表性的例子说明 5G 对光模块的需求。

(1) 5G 前传对 25 G BiDi 光模块的需求

在 4G 时代,前传网络对光模块的需求以单模 10 G Duplex 为主。到了 5G 时代,前传网络仍将以光纤直驱为主,但对光模块的速率和光口提出了新的要求。考虑到节省光纤资源、上下行等距能保证高精度时间同步,BiDi 的产品形态比 Duplex 更具优势。另一方面,5G 相比于 4G 在下载速率上至少有 10 倍的提升,在以太网通用公共无线电接口(eCPRI)协议下^[1],25 Gbit/s 的速率也成为必须。基于上述 2 方面的考虑,25 G BiDi 光模块能更好地满足 5G 前传的需求。10 km 的传输距离能覆盖大多数应用场景。在波长选择上,1 270/1 330 nm 方案将有利于实现低成本光模块。

(2) 5G 回传对 50 G PAM4 光模块的需求

5G 的中传网络或回传接入层将对 50 Gbit/s 速率的光模块有需求。考虑到低成本实现方式,基于 25 G 光器件、辅以脉幅调制(PAM4)调制格式将成为更具吸引力的一个方案。50 G PAM4 光模块有 10 km 以及

1 5G 对光模块的需求

随着对下载速率要求的逐渐提高,无线通信愈加依赖于光纤通信。当前的无线通信网络,除了“最后一公里”是“无线”形态,天线之后的通信链路全部是光纤网络。到了 5G 时代,代际升级所带来的绝不仅仅是下载速率的大幅提升,在 4G 时代所不具备的低时延、大规模机器通信的特点将催生诸如无人驾驶、万物互连等全新的应用。因此,5G 无线通信对生活的改变将远超过 3G 和 4G。光纤通信所具备的大容量、长距离的天生优势极好地满足了

5G 对承载网络的要求。在前 5G 时代,光纤通信技术和产业得以快速发展的终端驱动力是以有线形式接入的家庭和企业,“光纤到家”和“光纤到楼”的普及和后续升级带动了接入网、城域网、骨干网的全面覆盖和性能升级。在 5G 时代,以无线形式接入的手机、汽车、家电、工业设备等作为新的终端,将跟固网接入的终端共同推动光纤通信的技术进步和产业发展。

4G 的部署为光模块行业带来了一个新的细分市场,5G 的需求将为无线光模块市场注入新的动力并进一步增大该细分市场的空间。5G 网络所具备的站点密度增大、时间同步精度提高等特点对光模块的功能和性能提出了新的要求。接下来,将以

收稿日期: 2018-06-23
网络出版日期: 2018-07-30

40 km 2种主要规格。10 km规格能以25 G波特率直接调制激光器实现,同时也保证了低成本。40 km规格则需要使用25 G波特率电吸收调制激光器和雪崩光电探测器。另一方面,10 km和40 km的规格均对高线性度的激光器驱动器和跨阻放大器有需求。

(3) 5G回传对低成本相干100 G光模块的需求

5G回传网络的汇聚层和核心层,对相干100 G、200 G、400 G光模块有需求,波长在C波段,传输距离一般在200 km以内。低成本的相干100 G光模块被视为单元技术,基于此单元技术,依靠波分复用技术可实现更高的传输带宽。

2 低成本是5G无线光模块的关键

在过去几年里,4G无线光模块的市场售价几乎是每2年下降40%,有利地促进了4G的大规模部署。可以说,4G无线光模块较好地满足了下游客户对其低成本的要求。究其原因,其中之一是产业链恰到好处地定义了不同类型的光模块规格,在满足性能指标要求的前提下,以低成本的技术手段实现所需要的功能,例如:将10 G垂直腔面发射激光器(VCSEL)技术用于150 m以内传输距离的光模块,将10 G法布里-珀罗(FP)激光器技术用于1.4 km以内传输距离的光模块;而对于10 km传输距离的需求,则使用10 G分布式反馈激光器(DFB)技术。简而言之:性能要求高的场景,选择较贵的技术;而性能要求低的场景,选择较便宜的技术。

到了5G时代,光模块的需求量将超过4G时代,低成本将依然成为产业链对光模块的主要诉求。根据应用场景的不同,针对不同的传输距离定义出几种不同规格的光模块,并根据规格选择相应的技术手段,这也许将继续成为5G无线光模块实现低

成本的有效策略。

共享产业链也将有利于达成低成本目标。数据中心光互联对高带宽的需求是领先于固网接入和无线接入的。因此,25 Gbit/s速率的光器件早已被广泛应用于数据通信光模块。基于数据通信光模块已经大量使用的光器件及其相关技术来开发5G无线光模块,也是实现低成本的策略之一。例如:25 G BiDi光模块所使用的25 Gbit/s 1 270/1 330 nm的激光器,和用于数据中心100 G粗波分复用器(CWDM4)光模块^[1]所使用的激光器类似,区别在于其不同的温度范围。

实现低成本最根本的手段是技术创新,包括网络架构、物理层光器件、网络协议等各个方面的创新。例如:4G时代远端射频模块(RRU)和基带处理单元(BBU)之间的信号传输使用CPRI协议,为应对5G对带宽更高的要求,第3代合作伙伴项目(3GPP)提出了新的协议标准eCPRI,前传接口带宽得以被压缩至25 G,从而降低了光模块的成本,这是在网络协议层面的创新。再例如:考虑到无线应用场景对工业级温度的刚需,以工业级温度范围的激光器替代商业级温度范围的激光器,将降低光模块的封装成本,这属于光器件物理层的创新。

国产化替代也是实现低成本的手段之一。国际上领先企业得益于其长期的技术积累,往往率先推出高性能的光电子器件,定价权也就掌握在少数几家企业手中。价格高昂的激光器芯片、探测器芯片、电芯片往往制约着光模块的成本下降。实现光电子芯片的国产化必将有利于5G无线光模块的成本下降。

3 5G无线光模块的关键技术

光模块的使能技术可分为封装技术和光/电器件技术。技术创新也基本体现在这2个方面。5G无线光

模块所需的封装技术大部分可借鉴现有的成熟技术。例如:25 G BiDi光模块的光路结构与10 G BiDi光模块类似,因此,可采用非常成熟的、基于TO-CAN同轴封装技术的光收发模块接口组件(BOSA)结构,无需开发新的工艺,生产设备也可共用,这样也更有利于实现低成本。再例如:非相干的200 G/400 G光模块是基于单波50 G的单元技术,辅以波分复用技术来实现,在封装技术上,跟数据通信光模块所采用的手段类似。

5G无线光模块所需的关键技术将更多地体现在光/电器件技术方面。总结来说,光电子器件的技术创新可体现在这3个层面:功能的扩展、速率的提升、成本的下降。例如:工业级温度范围的激光器芯片将不再需要温度控制器件;适用于非气密性环境的激光器芯片将不再需要昂贵的气密性封装管壳;小发散角的激光器芯片将不再需要较为昂贵的非球透镜;抗反射的激光器芯片将不再需要隔离器。这类创新均属于对激光器芯片功能的扩展,激光器芯片功能的扩展将简化光模块封装,不仅提高了可靠性也同时降低了成本。

50 G PAM4光模块采用的是25波特率激光器和探测器,以及高线性度的电芯片。相比较于25 G不归零码(NRZ)光模块,对光器件的带宽、电芯片的线性度均提出了更高的要求。再例如:单波100 G光模块将采用50 G波特率的光电子器件,当性能可以满足10 km传输且成本足够低时将成为5G前传的方案之一。上述2个例子均属于光电子芯片在速率提升方面的创新。

对于5G回传网络,低成本相干100 G光模块是十分渴求的技术。如何将应用于远程骨干网的相干技术简化,在满足200 km以内传输距离要求的前提下尽可能地降低成本,是个非常好的研究课题。这类技术可归类为降低成本的创新。

综上所述,5G无线光模块的关键

技术更多地体现在光电子芯片的创新上,具体的技术包括:

- 工业级温度范围的高速激光器芯片技术
- 高线性度 25 G 波特率 DFB 芯片和 EML 芯片技术
- 低成本 25 G 波长可调谐激光器芯片技术
- 低成本非相干 100 G 的光模块技术
- 低成本相干 100 G/200 G/400 G 光模块技术
- 高线性度 25 G/50 G 的电芯片技术。

4 结束语

相比于 4G 时代,5G 无线光模块将在整个光模块市场中占据更重要

的地位,5G 将成为光模块行业发展的下一个风口。5G 无线通信所具备的高带宽、低时延、大连接的特点对光模块的功能和性能提出了更高的要求,将推动光模块、光电子芯片技术的进步。技术创新和国产化替代将是实现低成本 5G 无线光模块的主要途径。

参考文献

- [1] CPRI. A Successful Industry Cooperation [EB/OL].(2014-09-09)[2018-06-23]. <http://www.cpri.info/>
- [2] CWDM4 MSA. About CWDM4 MSA [EB/OL].(2014-09-09)[2018-06-23]. <http://www.cwdm4-msa.org/>

作者简介



张华,青岛海信宽带多媒体技术有限公司技术合作总监;从事技术与产品的战略规划、技术合作,在光电子集成芯片、光通信器件封装技术方面拥有 10 余年经验;曾主持过多项科技项目;已发表多篇论文、拥有多项发明专利。



黄卫平,青岛海信宽带多媒体技术有限公司的创始人之一,现任首席科学家,山东大学教授;负责海信宽带多媒体技术公司战略发展、高端技术研发和激光器芯片国产化;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理论等,为光电集成器件设计和分析提供了有效工具;已发表 200 余篇国际学术刊物论文、100 余篇国际学术会议论文,并持有 7 项美国专利。

VR的技术发展趋势和行业应用

Trends and Industry Applications of VR Technology

尹芹/YIN Qin

吕达/LYU Da

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

1 VR的概念

1.1 VR的作用

1965年,虚拟现实(VR)的概念被首次提出。2016年,Oculus、HTC VIVE、PS VR等各种VR硬件层出不穷地面世,该年也被称为VR元年。受限于制作精良、吸引用户眼球并可持续使用的VR内容,受限于带宽以及更高清分辨率的显示技术,VR仍然处在爆发前夜。

VR可用于视频直播、视频点播、视频游戏,以及垂直行业的多个应用场景,拉近人与人、人与物之间的距离,带给用户沉浸、互动的感受。

2017年,中兴通讯推出端到端的VR直播解决方案,并成功应用于南艺520直播。

1.2 VR的挑战

(1)带宽挑战。运营商开展VR视频业务之后,对带宽的需求约为300 Mbit/s~1.2 Gbit/s,最高可能将会超过1 Gbit/s,因此千兆带宽及至5G网络将会给用户带来更佳服务体验,

收稿日期:2018-06-18

网络出版日期:2018-07-31

基金项目:国家高技术研究发展(“863”)计划(2014AA015200)、国家科技支撑计划(2012BAH02B03)

中图分类号:TN929.5 文献标志码:A 文章编号:1009-6868(2018)03-0054-004

摘要: 提出虚拟现实(VR)面临的2种技术发展挑战:高带宽、低时延。围绕VR的发展,中兴通讯创新性地提出端到端VR系统方案的技术理念,研发出一系列创新技术用于实现VR业务,例如:低码高清技术、基于视野(FOV)的自适应传输技术、VR电子节目指南(EPG)、VR机顶盒、VR播放器,并基于网络功能虚拟化(NFV)技术构建出云化VR网络架构。这些技术和方案进一步地促进了VR的发展。

关键词: 低码高清; FOV; 基于FOV的自适应传输

Abstract: In this paper, two kinds of technical development challenges faced by virtual reality (VR) are proposed: high bandwidth and low delay. Focusing on the development of VR, ZTE innovatively proposed the technical concept of an end-to-end VR system solution. A series of innovative technologies were developed to implement VR services, such as low-code high-definition technology and angle of view (FOV)-based adaptation transmission technology, VR electronic program guide (EPG), VR set-top box, VR player, and cloud-based VR network architecture based on network function virtualization (NFV) technology. These technologies and solutions further promote the development of VR.

Keywords: low-code high-definition; FOV; FOV-based adaptive transmission

内容分发网络(CDN)也将为运营商节约更多带宽消耗。

(2)时延和丢包挑战。VR要求运动到图像的最大时延在20 ms,运动到声音的最大时延在20 ms,并要求音视频保持同步。

(3)完美拼接。通常需要在一组摄像机设备上采集,然后再进行拼接处理,将来自不同摄像机的视图合并到一个视图中。为保障完美的VR体验,不应引入任何拼接错误,不应看到任何拼接线。

1.3 VR的演进过程

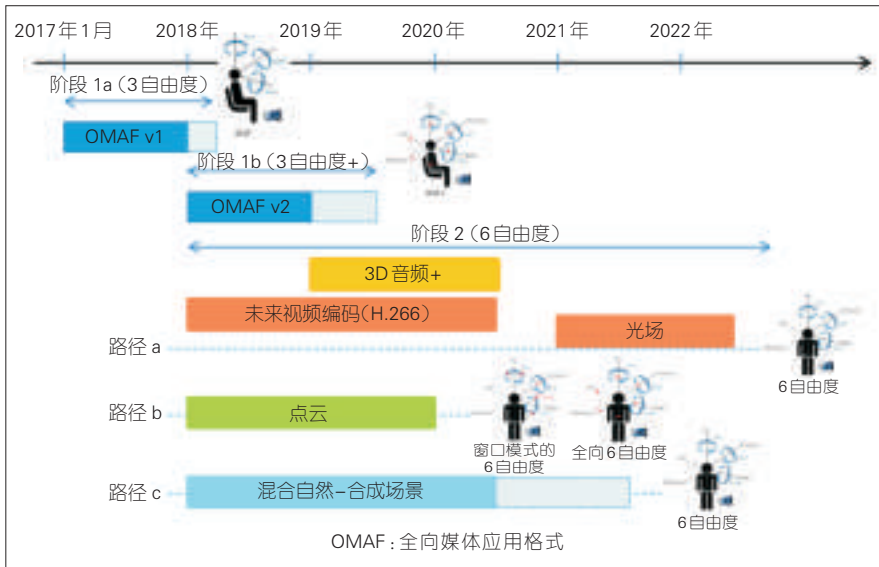
动态图像专家组(MPEG)、第3代合作伙伴项目(3GPP)、数字音视频编解码技术标准(AVS)、中国通信标准化协会(CCSA)等多个全球标准组织正在积极推进和制订VR相关标准。其中,MPEG国际标准组在2015

年10月启动全向媒体应用格式(OMAF)项目,主要针对360视频以及对应的音频,研究相应的文件封装格式,以及在基于HTTP的动态自适应流(DASH)方式下的传输,同时还包括编码的配置、视点的投射等。MPEG OMAF之后,MPEG标准组织认为有必要成立MPEG-I,并包含OMAF。MPEG-I标准的工作时间轴如图1所示。

MPEG-I的标准制定,又分为3个阶段^[1]:阶段1a、阶段1b、阶段2,具体如下表1所示。

阶段1a(3自由度):在特定观察位置,当头部左右旋转、俯仰旋转、摇摆旋转时,VR头显能正确显示相应VR内容,需要VR内容、VR采集和VR显示设备的支持。

阶段2(全向6自由度):在特定观察位置,当头部左右旋转、俯仰旋



▲图1 MPEG-I标准工作的不同阶段

▼表1 MPEG-I的不同阶段及说明

阶段	自由度	说明
1a	3自由度	围绕X轴、Y轴、Z轴的3次旋转和非限制运动(分别为俯仰、偏航、翻滚)
1b	3自由度+	在3自由度的基础上,沿X轴、Y轴、Z轴额外、受限的平移运动(典型情况下,头部左右、上下、前后移动)
2	(内容)窗口模式的6自由度	围绕X轴、Y轴(分别为俯仰、偏航)进行受限的旋转运动,并沿Z轴进行受限的平移运动
	全向6自由度	沿着X轴、Y轴、Z轴进行受限的平移运动(典型情况下,步行距离为几步)
	6自由度	在3自由度的基础上,沿着X轴、Y轴、Z轴进行完全平移(左右、上下、前后自由移动)

转、摇摆旋转,以及一定范围内向前后、左右、上下3个方向平移时,VR头显能正确显示相应VR内容,需要VR内容、VR采集和VR显示设备的支持。

阶段2(6自由度):典型的使用案例是用户自由穿过头戴式显示器(HMD)上显示的3D 360 VR内容(物理地或通过专用的用户输入装置)。

1.4 VR端到端架构

3GPP定义的VR视频架构^[2]由采集、球面拼接(可选)、投影(可选)、封包(可选)、编码、封装、传输、解封装、解码、渲染、显示各环节组成,如图2所示。

各细分环节的详细描述,参见如

下各章节。

1.4.1 采集

取决于采集系统的功能,VR内

容以不同的格式表示,例如:全景图或球体。许多系统采集覆盖整个360°×180°球体的球形视频。通常需要配置多个相机来采集这样的内容。配置的各种相机可用于记录2D和3D内容。采集环节可以使用立体相机组、鱼眼、广角镜头、相机阵列、光场相机阵列,产生立体效果或光场渲染效果的VR内容。

(1) 立体效果

(a) 分片立体效果:立体相机组采集3D内容,并以相对较小的重叠排列成星形配置;但这样的照相机系统一方面可能会有视差错误,另一方面基于镜像的系统可以使用减少视差错误的相机组采集3D图像。

(b) 极度重叠的立体效果:立体内容由鱼眼或广角镜头、相机阵列采集的重叠图像创建。在处理过程中,每个图像传感器分成左右2部分,并拼接成左右全景图。

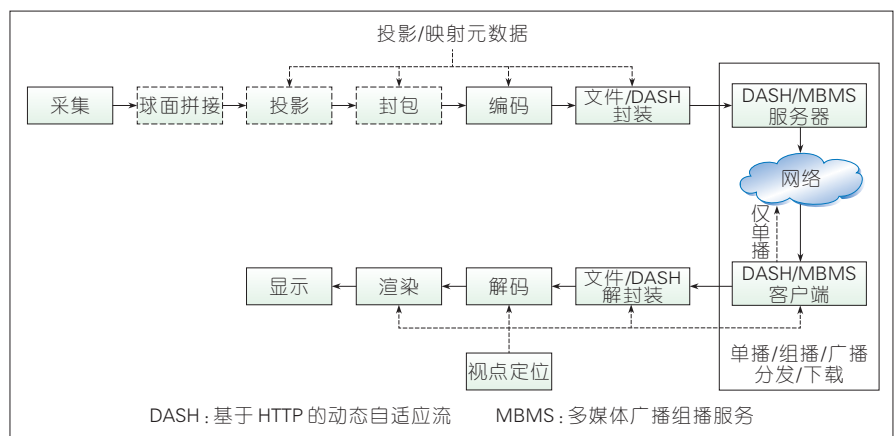
(2) 光场渲染

(a) 基于深度的光场渲染:是创建3D内容的有前途的方法;但是,光场渲染需要密集的相机阵列。

(b) 使用基于深度的渲染来生成中间相机视图:这是现有方法,可以减少所需相机的数量;但该方法需要非常精确的深度图和复杂的基于深度的处理流程,增加了所需算力。

1.4.2 球面拼接

球面拼接分为3种:基于镜像的



▲图2 3GPP虚拟现实视频架构

系统直接拼接、深度感知的拼接(分片立体效果,极度重叠的立体效果)、深度使能的光场渲染。

1.4.3 投影

最常用的VR投影方法包括2种:经纬度展开投影(ERP)、立方体投影(CMP)。

(1)ERP:水平、垂直坐标分别对应经度、纬度,不变换、不缩放。该方法的特点是:赤道上的像素拉伸最小(或一点都没有拉伸),而越向两极拉伸越严重,因此失真越严重。这就产生了大量冗余信息,不适合使用高效视频编码(HEVC即H.265)对其进行压缩。

(2)CMP:将球面全景图像映射到了立方体的6个面上,中间的4个面为前后左右的图像,上下3个面为顶部和底部的图像,每个面都有 $90^{\circ} \times 90^{\circ}$ 的视野(FOV)。在立方体投影中,直线保持笔直,便于对图像进行处理,相比于圆柱映射,失真要小很多。好处在于:减少了两极的冗余,减少了数据量;立方体投影中直线保持笔直,没有发生弯曲失真(这对于视频编码来说十分重要,因为运动矢量是直线);立方体投影对像素进行了分配,两极和侧面都是一样的;立方体投影的映射更加简单,只要将每一个面贴到对应的立方体面上即可。

投影方法除了以上这2种以外,根据用于渲染的几何类型,还有一些其他投影类型,如:球、压扁的球、圆柱体、柏拉图固体(正多面体)、立方体(6面)、八面体(8面)、二十面体(20面)、截断的金字塔、分段球体、直接鱼眼(用于视频监控控制等)。

1.4.4 区域映射(封装)

在投影之后,所获得的二维矩形图像可被分割成可重新排列以产生“封装”帧的区域。从投影帧产生封装帧的操作(表示为“封装”或“区域映射”)可能包括平移、缩放、旋转、填充、仿射变换等。执行区域映射的

原因包括:提高编码效率或依赖视点的流管理(详见多流方法)。

区域映射是可选过程,如果未使用区域映射,则封装的VR帧与投影帧相同。

1.4.5 编码&解码

目前的360视频服务提供了非常有限的用户体验,因为用户视点的分辨率、视觉质量与传统视频服务差不多。需要多倍于现有超高清(UHD)分辨率的分辨率,才能以足够清晰的分辨率覆盖完整的 360° 环境。这对现有已建立的视频处理流程链、现有的终端设备都构成了重大挑战。360视频传输主要考虑3种解决方案:单流方式、多流方式、分片式流方法。

1.4.6 文件/DASH封装/解封装

如果DASH用于传送360视频,则可能需要额外的信令,例如:投影和映射格式可能需要在媒体呈现描述(MPD)信令上体现,以便用户可以请求合适的不同码率、不同码率的码流,然后根据考虑的解决方案类型(单流、多流、分片式流)执行不同的文件/DASH封装。

接收器可以根据当前的视点位置、设备能力(例如:视频解码器能力),选择仅解封装所接收的视频流的子集。

2 VR行业应用

为解决用户体验、VR成本等问题,Cloud VR通过云端渲染为VR发展提供更佳的解决方案。

Cloud VR场景^[9]发展分为近、中、远期3个阶段,Cloud VR巨幕影院、Cloud VR直播、Cloud VR 360视频、Cloud VR游戏4个场景处于近期阶段;Cloud VR教育、医疗、营销、大空间竞技、健身、音乐、K歌场景处于中期阶段;Cloud VR旅游、社交、购物、军事、工程、房地产等场景处于远期阶段。十七大场景的商业潜力空间巨大,但离不开运营商的牵头。电信

运营商具备规模发展Cloud VR业务的必需条件,通过大管道、平台基础、用户、接入光纤资源等优势吸引优质的VR服务提供商、终端厂商、内容商等加入生态链,不仅可以赢得VR行业浪潮的商业先机,还可以带动整个VR产业的发展。运营商可以先发展Cloud VR 2C市场,再聚合行业应用,扩展到2B市场。

3 中兴通讯VR技术创新

3.1 低码高清技术创新

中兴通讯创新地提出低码高清、低码超高清技术,对H.264和H.265核心算法提出了5个方面的改进,在保证主观质量的情况下编码码率降为原来的40%左右,为高清和4K超高清视频业务的发展扫清了接入带宽方面的障碍,具体包括:

- 提出帧级码率控制方法,有效控制瞬时码率过高;
- 提出基于宏块距离的空间滤波方法,提高图像质量;
- 提出恰可察觉失真(JND)和人类视觉的感兴趣区域(ROI)相结合的分级量化编码方法,对在相同或降低码率的情况下,大幅提升视频编码的主观质量;
- 提出色度分量策略性编码方法,有效提升视频压缩效率,且视频主观质量不会有明显下降;
- 提出非ROI宏块采用变换域JND进行预测残差自适应调整编码方法,从而既保证了编码的主观质量,又降低了编码码率。

低码高清、低码超高清算法是一种复杂的综合算法,经过不同片源的综合评测,成为有效的图像算法,既可以应用在H.264的框架下,也可以融合在H.265编码标准下。

3.2 基于视点FOV自适应传输技术创新

中兴通讯融合CDN支持基于视点FOV自适应传输技术。

该技术的原理为:人眼视野范围内不同区域的敏感度不同,35°范围外不敏感;而FOV显示模式可以针对不同区域给予不同分辨率的图像。当视点发生变动时及时切换到对应的内容频道。

中兴通讯融合CDN能支持对各种自适应码率格式,扩展偏航角、俯仰角、主视场的水平视角,主视场的垂直视角等信息,根据用户头部运动,传输用户感兴趣的、基于视点的内容,有效降低带宽,缩短时延。

3.3 多场景的VR视频播放技术创新

(1) 机顶盒+头盔

机顶盒作为计算中心,提供图形计算、渲染等能力;头显提供VR呈现,具备九轴传感器,提供位置等信息给机顶盒;机顶盒和头显之间通过高清晰多媒体接口线(HDMI)和USB连接,HDMI传输VR视频,USB传输传感器信号。

(2) 手机+头盔

手机作为计算中心,提供图形计算、渲染等能力;手机屏幕提供VR呈现,提供位置、角度等信息给手机;通过VR眼镜的自带触控板或遥控器,便捷用户操作。中兴通讯提供VR页面、VR EPG能力、VR播放器能力支持VR点播业务。

(3) 裸眼收看VR业务

手机作为计算中心,提供图形计算、渲染等能力;手机屏幕提供VR呈现,提供位置、角度等信息给手机;通过VR眼镜的自带的触控板或遥控器,便捷用户操作。

4 结束语

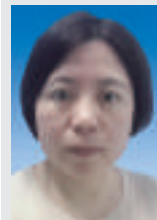
VR的发展过程是视频领域的一个技术创新的过程,中兴通讯创新地提出端到端的VR架构理念,形成了FOV视点自适应传输、低码高清、VR EPG、VR机顶盒、VR播放器等一批新技术并成功应用在VR系统中,从

而推动VR的全面发展。

参考文献

- [1] MPEG.MPEG-I Part 1 Technical Report on Architectures for Immersive Media[S].2017
- [2] 3GPP.Virtual Reality (VR) Media Services over 3GPP: 3GPP TR26.918[S].2018
- [3] 中国信息通信研究院.“Cloud VR+”场景白皮书[R].2018

作者简介



尹芹,中兴通讯股份有限公司产品总经理;主要研究领域为大视频、大数据、人工智能、云计算、固网、5G、网络安全等;先后主持和参加国家级基金项目5项,荣获省部级以上科学技术奖4项;已发表多篇论文,拥有发明专利30余项。



吕达,中兴通讯股份有限公司有线研究院副院长;先后主持和从事程控交换机、软交换、电信增值业务、数字家庭和基于IP的大视频解决方案的研发和管理工作,尤其是对于多媒体技术发展趋势和业务应用有深入了解;多次获得省部级奖;已发表论文5篇。

OGC 视频直播新时代展望

The New Era of OGC Live Broadcasting

尤琰/YOU Yan

张东卓/ZHANG Dongzhuo

孟晓斌/MENG Xiaobin

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

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 04-0058-005

摘要: 目前 OGC 视频直播存在 3 个问题: 现场编导瓶颈, 观众被动接收, 视频采集局限。在直播平权化潮流下, 品牌生产内容(OGC)视频直播需要开创以每位观众个性化体验为中心的新时代, 融合快速发展的人工智能(AI)、8K、虚拟现实(VR)、5G、边缘计算、网络切片等技术, 实现直播内容的新选择、显示终端上的新呈现、视频采集上的新视角和 OGC 视频直播新时代的新网络。

关键词: 视频直播; OGC; 边缘计算; 8K; 虚拟现实; 人工智能

Abstract: There are three challenges on occupationally generated content (OGC) live video broadcasting: limitation of live video broadcasting director, passive watching of the televiewers, and shortage of camera shootings. Under the trend of live video broadcasting democratization, OGC video broadcasting needs to create a new era centered on the individual experience of each audience, integrating the rapid development of artificial intelligence (AI) 8K, virtual reality (VR) 5G, edge computing, network slicing and other technologies. It realizes the new options of live video broadcasting contents, new presents of display terminals, new perspectives of camera shootings and new network of OGC live video broadcasting in new era.

Keywords: live video broadcasting; OGC; edge computing; 8K; VR; AI

1 当前 OGC 视频直播的流程和问题

1.1 视频直播的分类

视频直播是目前最能满足观众现场感和参与感的媒体传播形式之一, 在满足观众即时、直观获取信息的需求的同时, 也激发了集体想象力和凝聚力。

视频直播内容包罗万象, 观众最喜闻乐见的内容包括体育赛事、文艺活动、大型社会活动报道、演播室访谈、专业论坛活动、网络直播等。

从直播视频内容来源上讲, 视频直播包括: 品牌生产内容(OGC)、专业生产内容(PGC)、观众产生内容(UGC)3 种类型, 其中电视直播和互联网视频直播的一部分是 OGC, 大型活动的视频直播大多是 OGC, PGC 和 UGC 都属于互联网网络直播。简单地说, OGC 相当于职业的, PGC 相当于专业的, UGC 相当于业余的。

文中, 我们重点关注的是体育赛事直播、文艺活动直播、大型社会活动报道直播等大型视频直播活动, 都

属于 OGC。与 PGC 和 UGC 直播相比, OGC 视频直播的观众群和社会影响力更大, 也是加强民众凝聚力的有效方式。因此, OGC 视频直播对直播的可靠性、稳定性、用户体验等要求都更高, OGC 视频直播无论是意识审美、呈现方式、传播效果、观众体验, 都应该是优秀的。

1.2 OGC 视频直播的传播流程

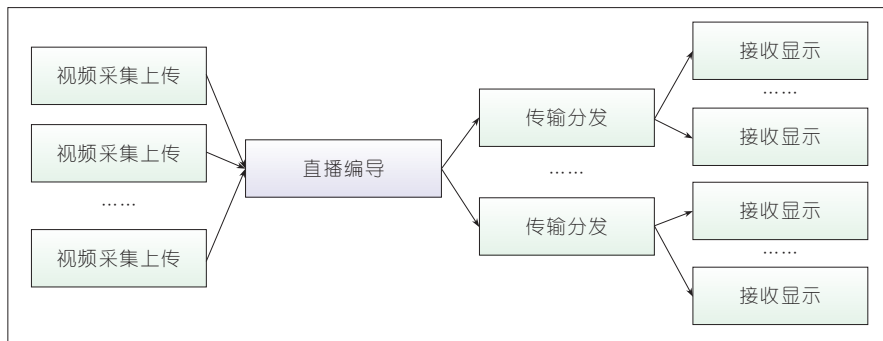
OGC 视频直播从媒体传播流程上看, 大致可以分为视频采集上传、直播编导、传输分发、接收显示 4 个环节, 如图 1 所示。

(1) 视频采集上传, 是由摄像机在直播现场拍摄视频, 并通过有线或无线的方式实时上传。对于大型视频直播活动来说, 需要多台摄像机,

以多角度、多方位对直播现场甚至周边环境进行视频直播采集, 以此让观众更全面具体地了解直播现场。摄像机包括有摄像师现场控制的摄像机和遥控摄像机 2 类, 后者一般由直播编导遥控。

(2) 直播编导, 是视频直播活动中的决定性环节, 负责采、编、播三大类活动, 具体包括调度指导摄像机或摄像师(采), 直播编导在将多个直播摄像机的视频内容进行选择切换或多画面编辑, 不时辅以慢动作回放等特效, 并配上语音解说、各种辅助信息, 形成一路特定编码格式的视频(编), 最后进行审核播出(播)。

(3) 传输分发, 主要需要通信网络。按照运营主体不同, 分为广电网络(含有线电视/卫星电视等)、交互



▲图1 品牌生产内容传统视频直播媒体传播流程示意图

式网络电视(IPTV)(电信运营商运营)和互联网视频平台网络3种,其中前者是相对封闭的专网,而后两者采用的是公共通信网络。在通信网络中,为了节省网络资源,解决网络拥挤,提高直播保障,内容分发网络(CDN)在直播视频分发中也显得非常重要。

(4)接收显示,由视频终端(电视、手机、平板、PC、虚拟现实(VR)头显等)从网络接收直播视频内容并解码和显示出来。

1.3 OGC 视频直播的问题

随着移动互联网的蓬勃发展和各种多媒体业务形式的涌现,观众的眼界和欣赏水平快速提高,现有的OGC视频直播越来越难以满足观众的要求。OGC视频直播面临3个问题:现场编导瓶颈、观众被动接收、视频采集局限。

(1)现场编导瓶颈。直播现场采集的视频有若干路甚至上百路,但播出时只有一路视频,编导环节屏蔽了绝大多数视频画面,这对于花费大量资金进行大型活动视频直播来说,无疑是一种资源浪费。另一方面,OGC视频直播对现场编导的要求极高,要求编导具有极高的统筹能力、专业知识、审美观、预见性,以及精力和体力;而在直播中很多时候难以做到很高的水准,如2008年北京奥运会CCTV现场直播的呈现效果就广受批评,而采用同样视频源的美国全国广播公司(NBC)版却好评如潮。当然,

NBC是延后半天播出的,已经不是直播了。

(2)观众被动接收。每个观众希望看到的内容和视点是有差异的,比如赛车直播,有些观众可能就喜欢长时间在某位喜欢的车手主观视角观看,而现场编导出的视频只能是一个统一的画面给所有观众,并希望照顾到大多数观众的兴趣,实际上这也可能让很多观众都不能满意和尽兴;另一方面随着弹幕和UGC直播的出现,观众希望更多地参与视频直播活动中,成为直播的一部分,也就是直播平权化。

(3)视频采集局限。目前的OGC视频直播采用的摄像机多数是固定摄像机,而移动摄像机较少,主要原因是移动摄像机采用专用的无线通信网络,一方面无法同时传输太多路直播视频,另一方面采用直播车或卫星中继导致通信成本过高。

随着第5代移动通信(5G)、人工智能(AI)、VR、8K等技术逐渐成熟,OGC视频直播需要新的传播理念,开创以每位观众个性化体验为中心的新时代;而直播内容的新选择、显示终端上的新呈现、视频采集上的新视角是OGC视频直播新时代的三大显著特征。

2 视频直播新时代的新选择

视频直播新时代的目标就是以每位观众个性化体验为中心,而传统的OGC视频直播中编导汇总播出统一的一个视频内容是无法满足所谓

“千人千面”的直播需求的。如果我们解构整个流程就会发现:目前编导这一环节并不是必不可少的,我们可以把多路甚至所有摄像机的视频直播画面(频道)一起推送给观众,让观众自己选择决定观看具体什么内容。

2.1 观众可选的直播视频种类

大致来说,观众可以选择的内容包括如下3种类型:

(1)多路甚至所有现场摄像机机位的视频画面;

(2)直播现场辅助信息,如现场解说、现场图文数据(地图、进程、比分等);

(3)统一直播画面,因为习惯看现有的统一直播频道的观众还是比较多的,因此传统的导播方式还需保留,只是可以降低等级为一个频道。同时,如果开放直播的导播权,那么其实可以有多个统一直播频道,让观众有更多选择。此外,随着AI技术的进一步发展,未来AI导播剪辑出的更精彩的统一直播频道,也是可以期待的。

2.2 用边缘计算实现个性化编导

因为带宽和成本的限制,以往视频直播只播出一路视频(频道)给观众;而在现在和不远的未来,随着通信技术尤其是传输网络和CDN系统的发展,使多路视频可以同时传输播出,使选择权由传统编导交给每位观众成为一种可能。

另一方面观众如果选择观看个性化画面,如某一个或某几个画面,并配以辅助信息,就相当于需要自己进行编导,需要有一定计算能力的终端如PC。对于绝大多数终端如电视和VR头显等来说,其计算能力不足往往无法胜任这种工作,这时由网路边缘计算节点——如复合CDN或者多接入边缘计算(MEC)来完成个性化编导的工作就是一个非常理想的选择。

边缘计算节点可以接收全部直

播频道的视频和信息,并根据观众的选择进行画面显示设定(当然可以先给出一个界面风格推荐),整合设定后推送一路匹配终端分辨率的视频给观众。这种方式将在满足观众千人千面的直播观看需求的同时,保证了终端观看质量,也保证了接入网络和传输网络具有较高的整体效率。

3 视频直播新时代的新呈现

在视频直播的观众终端上,观众可以选择只观看一个特定摄像机的内容,但大多数观众都习惯并喜欢终端上显示多个画面。调查显示:移动互联网时代多数观众习惯同时观看多个屏幕,而视频终端的发展,也对视频直播的呈现方式提供了更多的可能。

3.1 大屏幕 8K 和 4K 电视

大屏幕 8K 和 4K 电视,是视频直播新时代新呈现最理想的终端形式。所谓大屏幕电视,屏幕尺寸都应在 178 cm(70 英寸)以上。由于有巨大的显示面积和足够高的分辨率,8K 和 4K 大屏幕电视可以显示更多的画面和信息,给观众更多的自主选择权。图 2 以 8K 大屏幕为例给出了这种屏幕下的显示布局的一个案例。

在图 2 的案例中,观众最喜爱的画面在中央的 4K 主画面区域显示,四周有若干个 HD(1 080 P)子画面,包括 1 个统一直播画面和 6 个自选画面,以及 4 个固定图文信息区域。其

中 4 个图文信息区包括 2 个图文辅助信息区,1 个可选画面列表(列出所有机位及其编号),以及 1 个弹幕互动区。

用户可以对多画面进行编排控制,如可以将 1 个统一直播画面和 6 个自选画面随时切换到主画面上,这 7 个子画面也可以由用户随时选择为其他摄像机拍摄的可选画面。控制可以通过遥控器按键或语音控制来实现。

弹幕互动很好地体现观众参与和交互的渠道,同时汇聚人气,这一点在互联网直播上得到了很好的发展验证,在 OGC 视频直播中也同样可以获得成功。为了让观众弹幕留言更便捷,可以通过遥控器语音输入上传,并在网络边缘计算节点上对比过滤直播背景和解说声音,完成精准的语音识别和文字转换。为了保证互动内容的健康文明,可以在网络边缘计算节点上通过 AI 对互动弹幕的内容进行审核和处理。

显示画面和信息的多少由观众来自行决定,喜欢简洁画面的观众可以只选择更少的画面甚至只有 1 个画面。在网络边缘计算节点上也可以提供多种风格的画面供用户选择,也可以通过用户历史观看喜好,设定每个用户的专属画面显示格式。

3.2 4K 以上 VR 头显

VR 可以提供更好的沉浸感和现场感,如果视频直播中有全景摄像频

道,也是一个非常好的呈现选择。为了有更好的效果,VR 头显上的显示屏分辨率应该至少在 4K 以上,8K 分辨率头显将会有更优的效果保障。当然,如果未来有达到视网膜分辨率级别的 16K 分辨率 VR,那将是最佳选择^[1]。

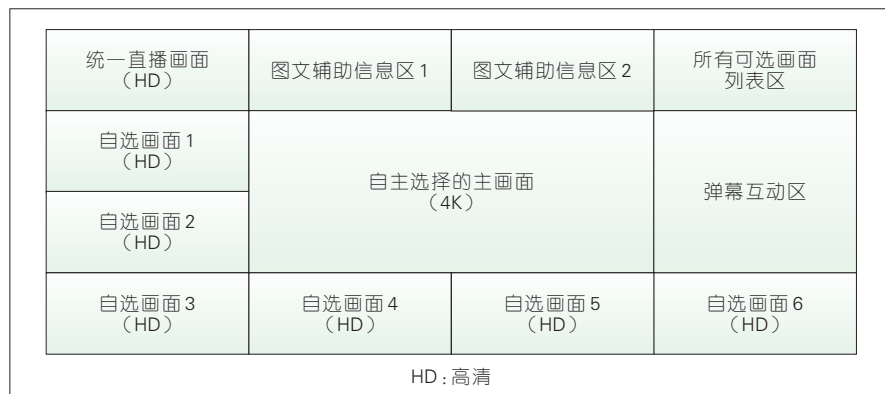
在 VR 头显的显示布局上,可以以某个 VR 直播画面为基础,在全景画面的适当部位叠加观众自选的画面窗口和信息窗口。观众也可以选择控制画面放大缩小。同上面大屏幕 8K/4K 电视的方式一样,显示布局也可以在网络边缘计算节点上进行选择和设定。

VR 全景视频有 2 种传输方式:一是全景全部传输(或称视点独立全景视频传输);二是只传显示屏幕所示区域(FOV)画面(或称视点自适应全景视频传输)^[2]。后者的传统方式是预设多个角度的画面,并根据视点方向选择传输相应的预设画面,以减少带宽占用和头显解压的计算力,对接入带宽有限的场景来说是一个比较好的解决方案。当然多个角度的预设画面会增加云端存储空间占用,是一种用存储换带宽的方法。

而在为每个用户提供个性化直播体验的方案中,全景视频也可以不用预设多角度画面,网络边缘计算单元可以提前计算头显屏幕应当显示的视场画面范围,并传输给用户的 VR 头显(如果上面提到的方式叫“预制”视点自适应方式,那么这种方式可以被称作“即时”视点自适应方式)。这样云端的存储空间和接入带宽都得到了节省,只是需要耗费一点额外的计算力。

3.3 中等屏幕 4K 电视和 HD 电视

中等屏幕是 89 cm(35 英寸)到 178 cm(70 英寸)之间的 4K 或 HD(1 080 P)电视,这个尺寸和分辨率的电视显示的画面和信息较 8K/4K 大屏幕电视应该更简洁一些。如 HD 电视上将主画面尺寸设置为 720 P,另外



▲ 图 2 8K 大屏幕视频直播多画面显示布局示例

设置 5 个 360 P 的子画面和图文区,会有较好的呈现效果。为了有更好的观看体验,在观看多画面内容时,观众的观看距离应该比看传统单一画面时更近一些。

3.4 其他终端

(1)手机和 PAD 这 2 种移动终端的屏幕尺寸和分辨率较小,观看距离也较近,因此多画面显示时单个画面太小,观看难度和疲劳度增加,并不会让观众有更好的观看体验,因此不建议在这 2 种终端上采用多画面用户自主选择的视频直播观看方式。

(2)小屏幕数字电视,89 cm (35 英寸)以下的数字电视,基本上只有 1 080 P,1 080 i 或 720 P,分辨率和屏幕尺寸都较小,也不是多画面显示的好选择。

(3)非数字电视,由于技术上无法与网络边缘计算节点进行交互和画面选择控制,则无法进行多画面的显示。

(4)PC 进行多画面显示采用本地计算即可,如果显示屏足够大且分辨率大于 1 080 P,则进行多画面显示也会有较好的呈现效果。与小屏幕数字电视不同,PC 显示屏的观看距离比电视更近,视角范围更宽,因此相对可以有更好的观看效果。

综上所述,视频直播新时代新呈现的承载终端,优先选择大屏幕 8K 和 4K 电视、4K 以上 VR 头显和中等屏幕 4K 电视和 HD 电视。

4 视频直播新时代的新视角

在 Pre 5G 和 5G 时代,无线网络带宽大幅度增加,可以为移动摄像机提供更多的直播采集上传通道,同时也解决了由传统直播车或卫星中继导致的通信成本过高问题。

更高的带宽、更低的成本,使得大型视频直播活动中采用更多的移动摄像机成为可能。更低的成本、更小型化的便携摄像机,使得直播采集的创作空间大幅度提升。

移动摄像机和 VR 摄像机可以放置在无人机上,在低空巡航拍摄,并提供新颖的动态视角。在竞技体育的直播活动中,移动摄像机也可以放置在参赛选手身上或装备上,如赛车的车中,橄榄球、冰球、棒球等运动员的头盔中,冰雪运动的滑具上,运动员的胸前等。

观众可以通过多个移动摄像机的视角来感受现场气氛,或翱翔于场馆上空,或“灵魂附体”于自己热爱的选手上,以选手的主观视角来“参与”比赛。

5 视频直播新时代的新网络

综上所述,视频直播新时代的媒体传播流程与传统模式有了较大改变,如图 3 所示。

可见,除了需要 8K 电视、新便携摄像机、VR、AI 技术和产业的成熟外,OGC 视频直播新时代需要通信网络进行一定的升级更新,集中体现在边缘计算、高带宽承载、5G 和网络切片等关键技术和特性。

5.1 边缘计算

边缘计算节点在视频直播新时代中扮演了观众专属执行编导的角色,与传统的云计算模式相比,边缘计算节点更靠近用户,有更短的响应时间和更好的业务体验保障^[9]。

在结合人工智能之后,边缘计算可以支撑很多业务应用,尤其是在一些终端计算能力不足的时候提供网络计算力支撑,也可以降低终端成

本。在前面的案例中,普通显示终端本来并没有多画面编导能力,是边缘计算赋予了它这种能力。另一方面,边缘计算保证接入网络和传输网络具有较高的整体效率。

目前看来,可以服务于视频直播新时代的边缘计算形式有 2 种:MEC 和复合 CDN。MEC 是多接入边缘计算,距离用户更近;而复合 CDN 相当于在原有的边缘 CDN 站点中增加一些计算能力,以满足越来越多的对网络计算能力业务的需求。

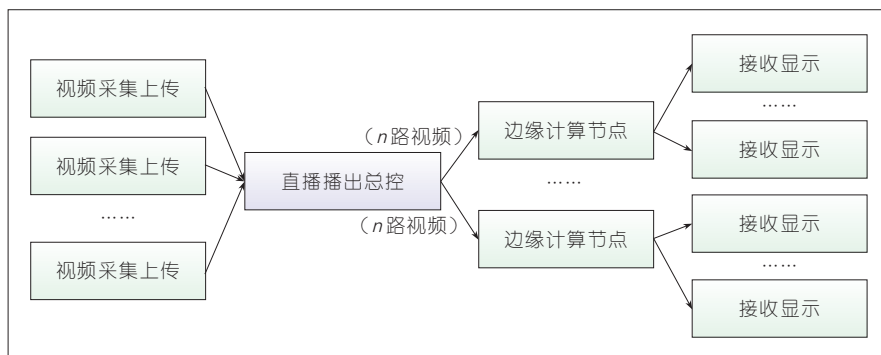
5.2 高带宽承载

从图 3 可见:从直播播出总控到网络边缘计算节点之间,原来只有 1 路视频,而现在是多路视频,这需要其中的承载网络具有更高的带宽和多媒体业务承载能力。随着多媒体业务对通信网络需求的提高,承载网络也在不断升级,带宽不断增长。

视频直播如果是 4K 分辨率,根据画质、帧率、色深的不同,1 路视频码率约为 15 ~ 50 Mbit/s^[10],如果需要在承载网络中同时传输 50 路直播视频,同时考虑网络 1.5 倍的冗余度,则总带宽需求约为 1.125 ~ 3.75 Gbit/s。目前公共通信网络中的承载网是可以满足这种带宽需求,而广电网络则可能需要进行相应改造升级。

5.3 5G

5G 主要用于移动摄像机的视频采集上传环节,以及部分显示终端的接入连接。作为下一代无线通信系



▲图3 品牌生产内容视频直播新时代的媒体传播流程示意图

统,5G网络可以满足大带宽、海量接入、低时延高可靠性的通信需求。大带宽方面,可以为每个用户提供高达1 Gbit/s的平均连接速率和10 Gbit/s的峰值速率^[5],可以支持极致体验级别的VR视频传输以及多路平面视频同时传输;海量接入方面,每平方千米的总吞吐量将达到数十太比特每秒或者一百万终端接入;而低时延高可靠性特性可以将无线通信的空口时延降低到1 ms,满足多种业务对于低时延的要求。

5.4 网络切片

由于OGC视频直播新时代的直播活动需要更强大的网络支撑能力,而且呈现出离散突发的网络需求,如何灵活快速地调动和分配网络资源以保障视频直播质量,也是未来通信网络发展的一个重要问题。

这个问题的答案就是网络切片。在正在建设的5G网络和下一代有线网络中,以软件定义网络(SDN)/网络功能虚拟化(NFV)、云化为基础架构,采用了控制/转发分离、服务化架构、E2E网络的自动化编排管理、AI增强的智能网络等全新架构,来构建一张灵活可编程的智能通信网络。这样通信网络就可以实现物理网络资源的灵活切分,网络能力的灵活组合,按需构建出若干张匹配不同应用场景差异化需求的网络切片,并保障各个特定场景的差异化业

务体验。

在OGC视频直播新时代,可以基于通信网络的切片技术,按需快速构建适合的虚拟子网络,该虚拟子网络整合了有线无线接入、边缘计算、复合CDN、云计算、承载、核心网以及业务运营能力等网络资源和能力,无缝地适应OGC视频直播的采编、分发等业务需求,更高效率、更高质量地服务于OGC视频直播业务。

6 结束语

随着观众日益提高的审美需求、个性化选择需求和更高级别的交互需求,OGC视频直播新时代将在不久的将来到来。我们能够看到直播内容的新选择、显示终端上的新呈现、视频采集上的新视角,以及更多的新业务形态和生态。通信网络不断提升的带宽能力、按需弹性的云化网络架构,也将为OGC视频直播新时代提供优异的支撑,为每位观众提供优异的个性化直播体验保障。

致谢

本文得到中兴通讯尹芹、左罗、郝男男和张远建4位专家的帮助,谨致谢意!

参考文献

- [1] 中国智慧家庭产业联盟. IPTV VR技术白皮书[R/OL].[2017-02-11][2018-07-02]. <http://www.ttacc.net/a/a/case/2017/1221/50452.html>
- [2] 董振江,张东卓,黄成,等.虚拟现实视频处理与

传输技术[J].电信科学,2017,33(8):45-52

- [3] MEC ISG. White Paper No.28: MEC in 5G Networks[R]. ETSI, 2018
- [4] 中兴通讯.大视频,大未来-中兴通讯大视频白皮书V1.0[R/OL].[2016-06-27][2018-07-02]. <http://www.zte.com.cn/china/about/press-center/news/201606/201606271422>
- [5] 中兴通讯.5G技术白皮书[R/OL].[2016-04-22][2018-07-02]. <http://www.zte.com.cn/china/solutions/access/5g/424379>

作者简介



尤琰,中兴通讯股份有限公司系统方案部部长;负责中兴通讯前瞻性创新综合方案规划、顶层设计、平台规划等相关工作;其负责的ElasticNet解决方案、CO重构等产品解决方案均多次获得全球相关组织的重量级奖项,兴云物联网平台(ThingxCloud)获得2018年中国通信行业年度最佳物联网平台大奖,基于NB-IOT的智能停车方案在2018年MWC上获得GLOMO最佳互联生活移动业务大奖,此外其负责的大数据平台、人工智能平台、5G综合方案规划等工作也都获得了广泛关注。



张东卓,中兴通讯股份有限公司5G综合方案总监;主要研究领域为5G行业应用和虚拟现实等;已发表论文5篇,获得发明专利1项。



孟晓斌,中兴通讯股份有限公司5G综合解决方案规划总工;负责中兴通讯SDN/NFV综合方案规划、5G相关的端到端综合解决方案规划和总体架构设计等工作,多次代表中兴通讯在专业论坛中发言。

《中兴通讯技术》杂志(双月刊)投稿须知

一、杂志定位

《中兴通讯技术》杂志为通信技术类学术期刊。通过介绍、探讨通信热点技术,以展现通信技术最新发展动态,并促进产学研合作,发掘和培养优秀人才,为振兴民族通信产业做贡献。

二、稿件基本要求

1. 投稿约定

- (1)作者需登录《中兴通讯技术》投稿平台:tech.zte.com.cn/submission,并上传稿件。第一次投稿需完成新用户注册。
- (2)编辑部将按照审稿流程聘请专家审稿,并根据审稿意见,公平、公正地录用稿件。审稿过程需要1个月左右。

2. 内容和格式要求

- (1)稿件须具有创新性、学术性、规范性和可读性。
- (2)稿件需采用WORD文档格式。
- (3)稿件篇幅一般不超过6000字(包括文、图),内容包括:中、英文题名,作者姓名及汉语拼音,作者中、英文单位,中文摘要、关键词(3~8个),英文摘要、关键词,正文,参考文献,作者简介。
- (4)中文题名一般不超过20个汉字,中、英文题名含义应一致。
- (5)摘要尽量写成报道性摘要,包括研究的目的、方法、结果/结论,以150~200字为宜。摘要应具有独立性和自明性。中英文摘要应一致。
- (6)文稿中的量和单位应符合国家标准。外文字母的正斜体、大小写等须写清楚,上下角的字母、数据和符号的位置皆应明显区别。
- (7)图、表力求少而精(以8幅为上限),应随文出现,切忌与文字重复。图、表应保持自明性,图中缩略词和英文均要在图中加中文解释。表应采用三线表,表中缩略词和英文均要在表内加中文解释。
- (8)参考文献以20条左右为宜,不允许公开发表的资料不应列入。所有文献必须在正文中引用,文献序号按其在文中出现的先后次序编排。常用参考文献的书写格式为:
 - 期刊[序号]作者.题名[J].刊名,出版年,卷号(期号):引文页码.数字对象唯一标识符
 - 书籍[序号]作者.书名[M].出版地:出版者,出版年:引文页码.数字对象唯一标识符
 - 论文集析出文献[序号]作者.题名[C]//论文集编者.论文集名(会议名).出版地:出版者,出版年(开会年):引文页码.数字对象唯一标识符
 - 学位论文[序号]作者.题名[D].学位授予单位所在城市名:学位授予单位,授予年份.数字对象唯一标识符
 - 专利[序号]专利所有者.专利题名:专利号[P].出版日期.数字对象唯一标识符
 - 国际、国家标准[序号]标准名称:标准编号[S].出版地:出版者,出版年.数字对象唯一标识符
- (9)作者超过3人时,可以感谢形式在文中提及。作者简介包括:姓名、工作单位、职务或职称、学历、毕业于何校、现从事的工作、专业特长、科研成果、已发表的论文数量等。
- (10)提供正面、免冠、彩色标准照片一张,最好采用JPG格式(文件大小超过100kB)。
- (11)应标注出研究课题的资助基金或资助项目名称及编号。
- (12)提供联系方式,如:通讯地址、电话(含手机)、Email等。

3. 其他事项

- (1)请勿一稿两投。凡在2个月(自来稿之日算起)以内未接到录用通知者,可致电编辑部询问。
- (2)为了促进信息传播,加强学术交流,在论文发表后,本刊享有文章的转摘权(包括英文版、电子版、网络版)。作者获得的稿费包括转摘酬金。如作者不同意转摘,请在投稿时说明。

编辑部地址:安徽省合肥市金寨路329号国轩凯旋大厦1201室,邮政编码:230061

联系电话:0551-65533356,联系邮箱:magazine@zte.com.cn

本刊只接受在线投稿,欢迎访问本刊投稿平台:tech.zte.com.cn/submission

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141期
2018年8月 第24卷4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
中兴通讯技术杂志社
出版:中兴通讯技术杂志社

总编:王翔
常务副总编:黄新明
责任编辑:徐烨
编辑:卢丹,朱莉
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

编辑、发行:《中兴通讯技术》编辑部
发行范围:公开发行
印刷:合肥添彩包装有限公司
出版日期:2018年8月10日
中国标准连续出版物号:ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN
定价:每册20.00元