

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

尚有较大的距离。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

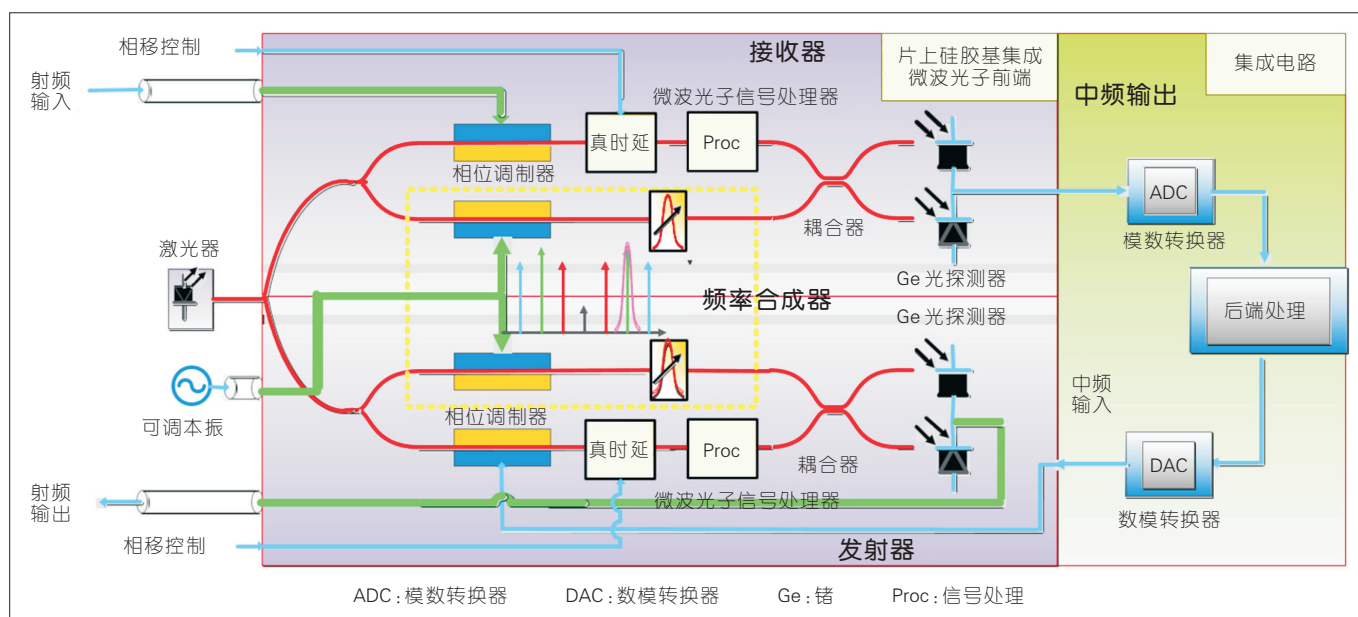
我们基于220 nm厚的SOI晶圆设计硅基集成微波光子前端芯片,并在微电子IMEC多项目晶圆代工平台进行加工,光路布版如图2所示,尺寸大小为2.5 mm×1 mm,其具体功能单元如下。

(1)硅基光波导

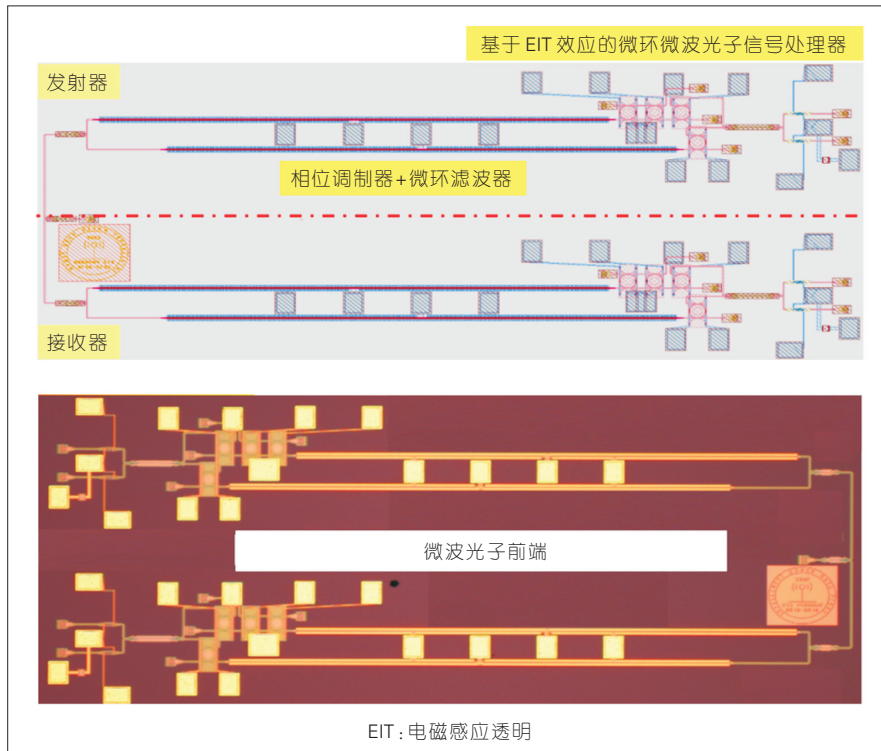
在该微波光子前端片上系统中,所有的连接波导均采用450 nm宽、220 nm厚的SOI单模波导,其弯曲半径可以小于5 μm。

(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

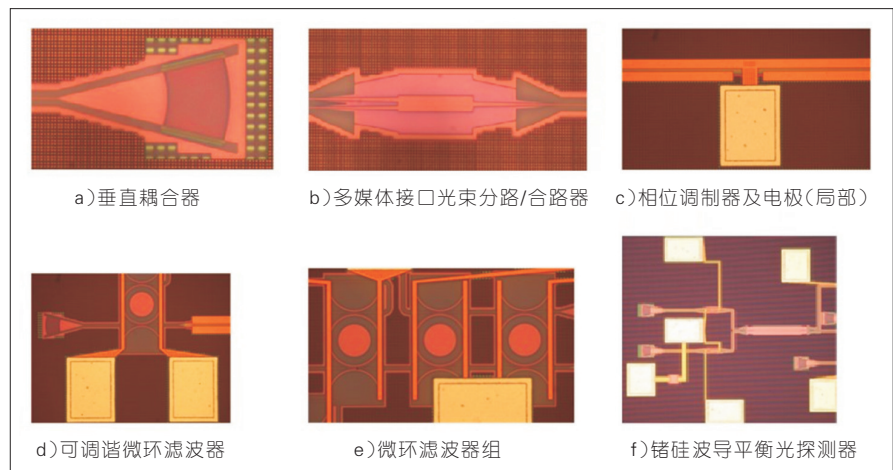
的发送与接收单元性能进行了测试。

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

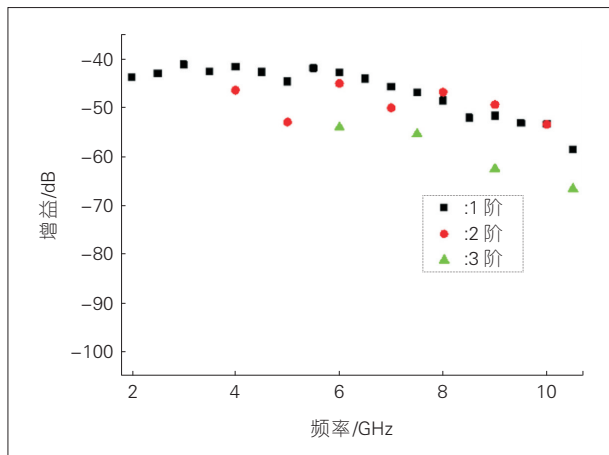


图4
微波光子前端芯片发送单元在不同频点的上变频增益

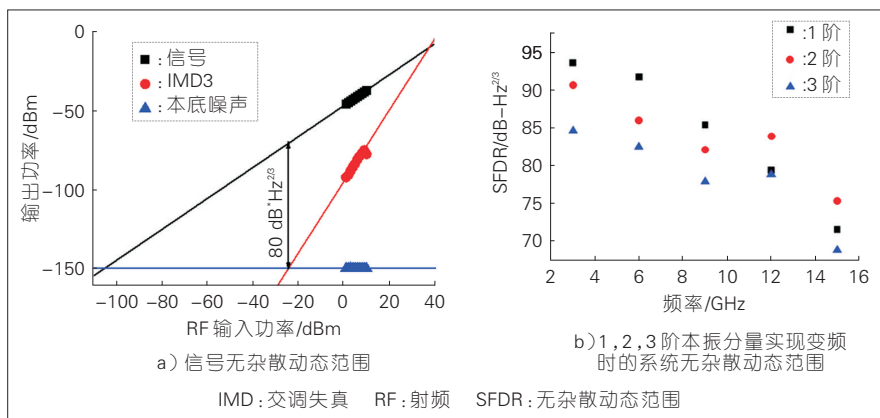


图5 微波光子前端芯片接收单元在不同频点的无杂散动态范围

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

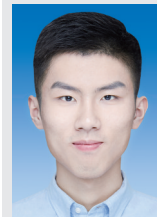
- [1] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave Photonics Combines Two Worlds [J]. Nature

- 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。