微波光子技术及应用专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022012701

集成微波光子射频前端技术

李佳琛，杨四刚，陈宏伟，陈明华*

（清华大学 电子工程系/北京信息科学与技术国家研究中心，北京 100084）

摘　要： 微波光子射频前端具有频率覆盖范围大、工作波段和瞬时带宽可灵活重构、抗电磁干扰等优势，在泛在无线通信、软件无线电、雷达和电子战系统中有着广阔的应用前景。为进一步减小系统的尺寸和功耗以满足实际应用的需求，构建基于光子集成芯片技术的微波光子射频前端微系统势在必行。文章分析了集成微波光子射频前端微系统目前在器件层面和系统集成层面面临的挑战，并从高精细、可重构的光滤波器设计、混合集成系统架构设计和系统频率漂移抑制方案三个方面重点介绍了作者所在课题组开展的关于混合集成可重构微波光子射频前端的研究现状。

关键词： 微波光子；集成光子；射频前端；混合集成

中图分类号： TN761　**文章编号：** 1001－5868(2022)01－0001－11

Integrated Microwave Photonic RF Frontend Technologies

LI Jiachen，YANG Sigang，CHEN Hongwei，CHEN Minghua

（Beijing National Research Center for Information Science and Technology，
Department of Electronic Engineering，Tsinghua University，Beijing 100084，CHN）

Abstract： Microwave photonic radio-frequency (RF) frontends，exhibiting the advantages of large frequency coverage，reconfigurable operation frequency bands and instantaneous bandwidths，and immunity to electromagnetic interference，have shown great potential in wireless communication，software-defined radio，radar systems，and electronic warfare. To further balance the performance superiority with the requirements of miniaturized application scenarios on size，weight，and power consumption (SWaP)，the implementation of integrated microwave photonic RF frontends has been considered as an upgrade path. In this article，the challenges of the demonstration of integrated microwave photonic RF frontends are briefly analyzed from the device design to the microsystem integration，and then the research of our group on the hybrid integrated reconfigurable microwave photonic RF frontend are presented from such three aspects：the design of reconfigurable narrowband integrated photonic filters，the architecture of hybrid integrated microsystems，and the method for suppressing the frequency drift.

Key words： microwave photonics；integrated photonics；RF frontend；hybrid integration

0　引言

物联网和自动驾驶等新兴应用领域伴随着移动通信网络技术的快速发展，促使泛在无线通信成为发展趋势，并且逐渐呈现出多业务融合、多频段覆盖的特点。在军事领域，宽带雷达成像、相控阵雷达、电子对抗等应用的工作频段不断扩展，逐渐延伸向毫米波波段，使得发展“综合射频一体化系统”[1]势在必行。“综合射频一体化系统”要求各子系统共用一套硬件资源，系统需要能兼容不同任务的工作频段、瞬时带宽和动态范围，能够灵活应对雷达监测、军事通信和电子战等多种任务。在该背景下，未来综合射频前端必须能够在复杂电磁环境下兼容不同

收稿日期：2022－01－27.
基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFB2800802)；国家自然科学基金项目(61771285).
* **通信作者：**陈明华　**E-mail：**chenmh@tsinghua.edu.cn

应用场景的技术需求，即要求其工作频段覆盖范围大且可灵活切换、瞬时带宽可重构、抗电磁干扰等；同时还具有较小的尺寸、较低的重量和功耗(SWaP)。

传统的微波射频前端典型架构如图 1 所示，其在满足上述技术要求上面临着诸多挑战。一方面，射频滤波器工作频段的全波段调谐难以实现[2]，不同工作波段的覆盖和切换需要利用开关和多组射频滤波器，这无疑进一步增加了前端系统的 SWaP；另一方面，带宽能大范围重构的射频滤波器难以实现[3]，导致射频前端的瞬时带宽无法兼容不同任务；除此之外，传统射频前端的电磁兼容和动态范围等性能也会随着频率覆盖范围的扩大而恶化。

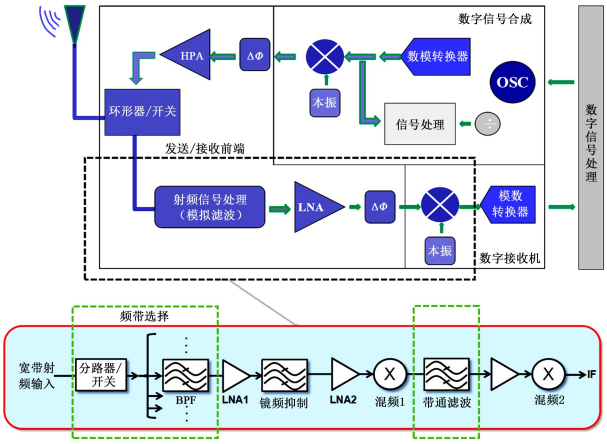


图 1 传统射频前端典型架构

一种克服传统射频前端性能瓶颈的方案是微波光子射频前端[4]，其典型架构如图 2 所示。待处理的宽带微波信号和本振信号通过光电调制器被上变频到光域，利用中心频率和带宽可重构的光子信号处理器(光滤波器)对微波光子信号的边带进行处理，再用光探测器得到混频后的微波信号。与传统射频前端相比，微波光子射频前端利用光滤波器中心频率易调谐和带宽可灵活重构的优势，实现了宽带可重构的微波光子射频前端系统。然而，目前基于分立器件的微波光子射频前端系统仍然存在 SWaP 大、成本高、可重构能力不足等问题。

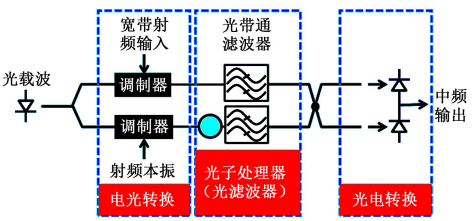


图 2 微波光子射频前端典型结构

随着近年来光子集成技术的快速发展，将核心光电器件集成到光芯片上构成片上微波光子微系统[5-6]被视为可行的技术路线。通过将微波光子射频前端系统的各单元器件集成到芯片上，则有望大大改善系统的 SWaP 和可重构性能。近年来，基于光子芯片的集成微波光子系统一直都是学术界和工业界研究的热点。2016 年，José Capmany 等[7]报道了首个单片全集成的微波光子滤波器，其光电元件都集成在 InP 平台上。然而，其调制器本征带宽只有 15 GHz，滤波器损耗较大且不可重构，系统无杂散动态范围(SFDR)不足 80 dB·$Hz^{2/3}$。最严重的问题是，片上电磁串扰的问题导致该滤波器无法实现完全的片上工作。这主要是因为尽管 InP 平台可以实现有源器件和无源器件的单片集成，但其较大的波导传输损耗严重限制了系统的性能，而这一点恰恰是硅基平台的优势。因此，由于目前尚不能基于单一集成平台实现核心光电元件的高性能集成，混合集成和异质集成的微波光子系统就成为一种折中的选择方案。尽管在工业届有研究人员开始尝试利用混合封装[8]的思想构建微波光子微系统，但是目前的研究仍多是基于体器件，如铌酸锂晶体调制器、光纤滤波器和光纤环形器等，导致其 SWaP 仍无法与片上微系统相比并且可重构能力不足。

构建基于混合集成的片上微系统是实现低 SWaP 可重构微波光子射频前端的有效途径，但目前仍在一些关键技术上面临挑战。我们从系统层面和器件层面分析了实现混合集成可重构微波光子射频前端面临的主要挑战。首先，前端的宽频段覆盖范围和瞬时带宽的可重构要求光滤波器具有全波段可调谐和可重构能力；前端对于微波信号的高精细处理能力要求光滤波器具有高精细的滤波带宽和较强的带外抑制(矩形滤波)。因此，高精细、可重构的光矩形滤波器是实现集成微波光子射频前端的核心功能元件。其次，为了提高前端系统的链路增益，需要提高电光调制和光电探测的效率；同时，构建用于混合集成系统的大功率光源模块和降低混合集成系统的链路光损耗也很重要；提高前端系统的无杂散动态范围则需要提高光电转换的线性度，同时降低系统的光源噪声；最后，抑制前端系统中的微波光子信号处理频率漂移对稳定系统性能至关重要，因为集成光滤波器和激光器的频率漂移最终都会导致微波域的频率处理发生显著波动。

因此，本课题组针对上文混合集成可重构微波

光子射频前端面临的主要挑战，在高精细、可重构的光滤波器设计、混合集成系统架构、微系统控制三个方面提出了一些解决方案。本文也从这三个方面进行展开，综述了本课题组关于混合集成可重构微波光子射频前端的相关研究成果。第一部分，介绍了三类应用于微波光子射频前端的片上高精细、可重构的全波段光域模拟信号处理单元。第二部分，以光域模拟信号处理单元为核心，通过将其与光源、调制器和探测器等模块混合集成构成微波光子微系统。在这一部分，介绍了两种不同的混合集成架构并提出了混合集成的低噪声、大功率、抗反射光源设计。第三部分，介绍了基于差分架构的微波光子射频前端信号处理的频率漂移抑制方案。

1　高精细、可重构的光信号处理

现有基于光纤或介质多层膜的体光滤波器往往难以实现全波段可重构的高精细滤波。因此，在微波光子系统集成化的过程中，设计片上高精细、可重构的全波段光域模拟信号处理单元是实现高性能集成微波光子射频前端的关键。这里我们总结了本课题组在集成高精细、可重构光滤波器方面的一些代表性工作。基于马赫-曾德尔干涉仪（MZI）和微环谐振腔这两种基础滤波结构，介绍三类应用于微波光子射频前端的光滤波器：基于多级级联 MZI 结构的有限冲激响应（FIR）型滤波器、基于亚波长缺陷微环谐振腔结构的无限冲激响应（IIR）型滤波器，以及基于级联微环辅助马赫-曾德尔干涉仪（RAMZI）结构的 FIR/IIR 混合型滤波器。前两类侧重高精细滤波，而第三类侧重滤波响应可重构。

1.1　基于多级级联 MZI 结构的 FIR 型滤波器

FIR 型数字滤波器的滤波特性由抽头的个数以及每一路抽头的延迟和权重确定。相对于 IIR 型数字滤波器来说，FIR 型具有设计简单、通带内具有线性相位的优点。光域的 FIR 型滤波器可以通过将一束光分成多路，对每一路进行不同延时和衰减再相干叠加的方式实现。最简单的片上 FIR 型滤波器是 MZI 结构。然而，对于单一的 MZI 滤波器，其 3 dB 带宽为自由谱区范围（FSR）的一半（滤波精细度为 2），即窄带滤波和宽处理带宽（滤波器对于双边带调制信号的处理带宽上限为 FSR 的一半）难以同时实现。因此，本课题组提出了基于多级级联 MZI 的结构[9]，在保证高精度滤波的同时，扩展了处理带宽，从而有效地验证了 FIR 滤波器应用于微波光子射频前端的可行性。

图 3 为 N 级级联 MZI 结构的原理示意图，其中第 N 级 MZI 的两臂臂长差为 $\Delta L_N = 2^{-(N-1)}L$。基于传输矩阵法，该结构的传输函数可以表示为

$$H=\prod_{i=1}^{N}\left(\sqrt{1-\kappa_{2i-1}}\sqrt{1-\kappa_{2i}}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\phi_i}-\sqrt{\kappa_{2i-1}}\sqrt{\kappa_{2i}}\gamma_i\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\beta(2^{-(N-1)}L)}\right) \tag{1}$$

其中，β 为波导的传输常数，ϕ_i，γ_i 分别为第 i 级 MZI 两臂的相位差和损耗差。当 $\kappa_{2i-1}=\kappa_{2i}=(1+\gamma_i)^{-1}$，当 $\phi_i=\pi$ 时，令 $z=\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\beta 2^{-(N-1)}L)}$，该传输函数可以简化为

$$H=(-1)^N(1+z^{-2^{(N-1)}})(1+z^{-2^{(N-2)}})\cdot(1+z^{-2^{(N-3)}})\cdots(1+z^{-1}) \tag{2}$$

并可以用 Z 平面上的零极点来表征。图 4 给出了一个三级级联 MZI 结构的零极点分布图。

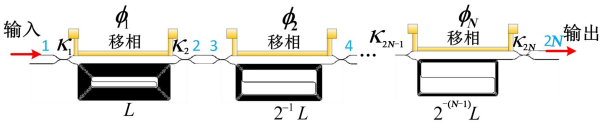


图 3　多级级联 MZI 结构

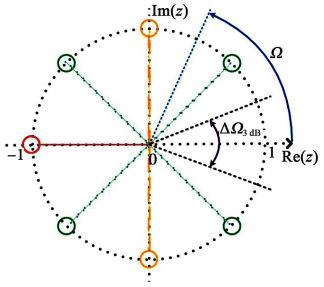
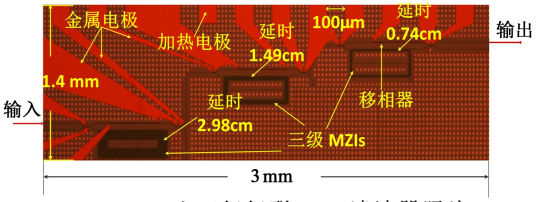


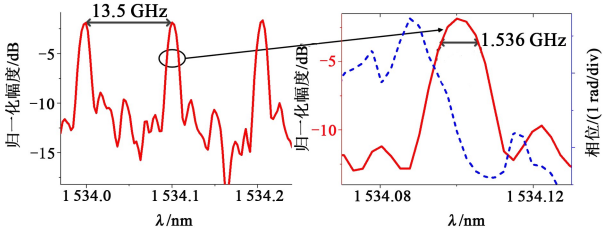
图 4　三级级联 MZI 结构的零极点图（绿色为第一级，黄色为第二级，红色为第三级）

该结构为 FIR 型滤波器，因此其 Z 平面仅由零点构成，一个 N 级级联 MZI 的结构共包含 2^N-1 个零点。根据零点图，滤波器的 FSR 仅由第 N 级 MZI 的两臂臂长差决定，即为 $c\cdot 2^{N-1}/(nL)$，相比于单级 MZI 扩大了 2^{N-1} 倍；同时，该结构的 3 dB 带宽主要由第一级 MZI 决定，约为 $c/(2nL)$，因此其精细度约为 2^N。

图 5 为在法国 LETI 提供的 SOI 平台上加工的三级级联 MZI 结构[9]的滤波器照片及测试结果。该结构的有效面积为 1.4 mm×3 mm，三级 MZI 中的两臂臂长差依次为 2.98，1.49 和 0.74 cm。该三级级联 MZI 滤波器的通带带宽为 1.536 GHz，同时 FSR 扩展到接近 13.5 GHz，通带内的相位呈线性。



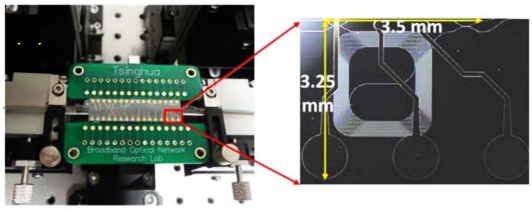
(a) SOI 上三级级联 MZI 滤波器照片



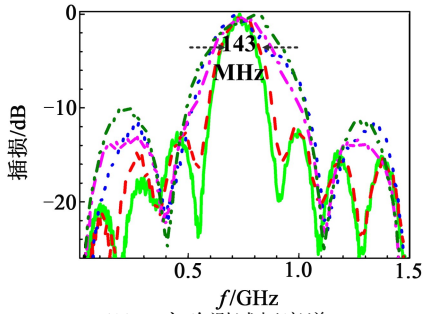
(b) 实验测试的幅度及相位谱

图 5 SOI 上三级级联 MZI 滤波器照片及测试结果

以这个 SOI 级联 MZI 滤波器作为光域信号处理单元,验证了一个具有高精细处理精度的微波光子下变频链路。实验中链路变频增益大于 0 dB,无杂散动态范围约为 104.1 dB·$Hz^{2/3}$,同时具备高精度信号处理能力。受限于 SOI 波导较大的传输损耗(3 dB/cm),该结构中 MZI 两臂长差难以进一步提高,因而限制了该级联 MZI 结构的滤波带宽。为了进一步提高信号的处理精度,我们在低损氮化硅波导平台上(TriPleX™,0.1 dB/cm)验证了相同的滤波器结构[10]。如图 6 所示,其中第一级 MZI 的两臂长差为 50 cm。该结构的 3 dB 带宽达到 143 MHz,FSR 扩展到 1.466 GHz,Q 值达到 1.3×10^6。FSR 还可通过进一步增加 MZI 阶数或级联信道滤波器来进行扩展。



(a) 氮化硅三级级联 MZI 滤波器照片



(b) 实验测试幅度谱

图 6 氮化硅三级级联 MZI 滤波器照片及测试结果

1.2 基于亚波长缺陷微环谐振腔结构的 IIR 型滤波器

IIR 型数字滤波器多基于反馈递归结构,因此同时具有零点和极点。相较于 FIR 型滤波器,IIR 型的设计维度更多,实现相同的滤波性能需要的阶数更低。一种典型的片上 IIR 滤波器是微环谐振腔结构。相比于 MZI 滤波器,IIR 滤波器的带宽并不直接受限于其 FSR,实现窄带滤波的同时并不需要牺牲其处理带宽,所以十分适合作为高精细的窄带光信号处理单元。然而,微环谐振腔的滤波响应为洛伦兹线型,其矩形系数(20 dB 带宽与 3 dB 带宽的比值)约为 10,说明其带外抑制并不是很好;并且作为 IIR 型滤波器,其通带内并不是线性相位,即不同频率处的信号延时并不相同,会造成信号失真。因此,我们提出了新型的亚波长缺陷微环谐振腔结构[11],作为微波光子射频前端中通带平坦且带外抑制强的矩形光滤波器。

亚波长缺陷微环谐振腔结构如图 7 所示,在微环谐振腔的波导上刻蚀出一个孔状缺陷来引入集总的米氏散射,进而实现受控的谐振峰分裂和频响调控。当光从 Input 端口输入后,会激励起腔内的逆时针(CCW)旋转模式。该 CCW 模式经过缺陷区域后,会通过缺陷引入的背向散射激励起少量的顺时针(CW)旋转模式。由于微环腔的相干积累特性,CW 模式会逐渐增强。因为 CW 模式和 CCW 模式处于同一微腔结构中,所以两种模式天然相位匹配,进而发生模式耦合。模式耦合导致这两个本征模式不再简并,进而导致微腔的频谱谐振峰分裂[12]。微环谐振腔也由原来的行波谐振腔变成了行驻波谐振腔。根据腔内光场的分布,可以将耦合之后的超模分为对称模和非对称模。

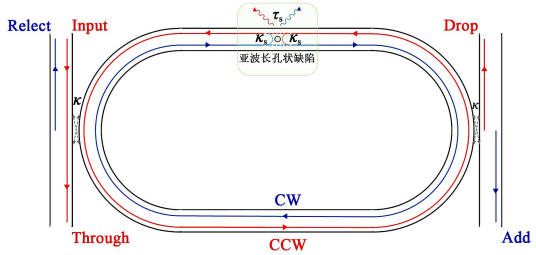


图 7 亚波长缺陷微环谐振腔

通过传输矩阵法求出亚波长缺陷微环谐振腔的传输函数,其传输响应的数值仿真结果如图 8 所示。两个模式的谐振峰分裂随着背向散射系数的增大而逐渐增大。当背向散射系数约为微环耦合系数的平

方时，该结构呈现出良好的矩形滤波响应，且消光比相比洛伦兹线型显著增大。因此，如何实现背向散射系数的精确控制便十分关键。通过三维时域有限差分法（FDTD）建模仿真分析发现，背向散射系数可以通过精确控制孔状缺陷的半径来改变。

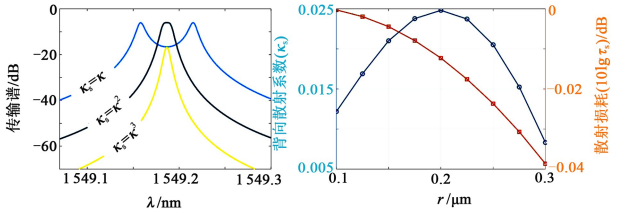
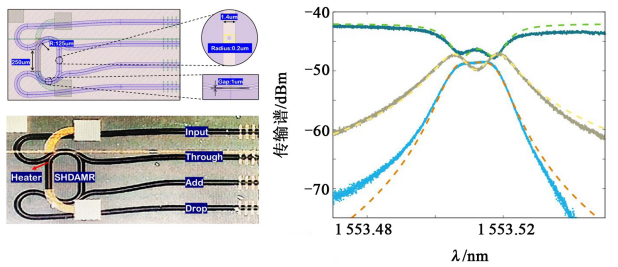


图 8　亚波长缺陷微环谐振腔的传输响应数值仿真结果。(a)不同背向散射系数下亚波长缺陷微环谐振腔传输谱响应；(b)不同半径的孔状缺陷引入的背向散射系数和散射损耗

我们在 200 nm 厚度的氮化硅平台上对该结构进行了实验验证。耦合系数设计为 0.15，孔状缺陷半径设计为 0.2 μm，如图 9 所示。实验中得到了 3 dB 带宽为 2 GHz 的通带平坦的矩形滤波器，它的矩形系数从洛伦兹线型的 10 显著优化到了 3.2。由于该结构仅由一个谐振腔构成，所以与常见的耦合多谐振腔结构[13]相比无需复杂的校准和调试操作，同时调谐也更为简便。



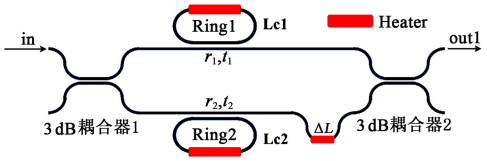
(a)　版图和实物图　　(b)　传输响应

图 9　氮化硅亚波长缺陷微环谐振腔的版图和实物图及传输响应测试结果

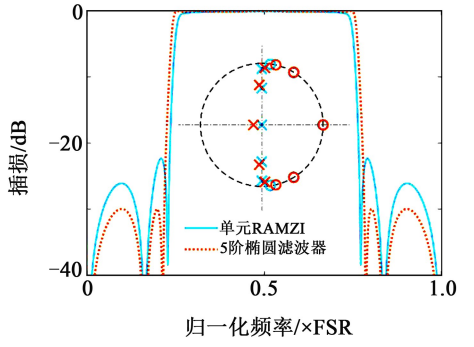
1.3　基于级联 RAMZI 结构的 FIR/IIR 混合型滤波器

上文探讨了利用级联 MZI 结构和亚波长缺陷微环谐振腔结构实现微波光子射频前端中的高精细滤波，本部分着重探讨可重构光滤波器的设计。目前可重构光滤波器设计大致分为两种方案：一种是通过光开关控制光的路径进而重构光路的拓扑结构[14]，利用同一波导网格可以实现 MZI、微环等不同功能。然而，微波光子射频前端中的光信号处理单元面向模拟信号处理，对于滤波器的幅相处理特性有精确的要求，因而该结构目前并不适合作为前端中的模拟信号处理单元。另一种典型的方案则是 lattice 结构[15]，其使用更为复杂的单元结构（MZI、微环、光栅）级联构成。lattice 结构尽管不能像波导网格一样实现光路级别的重构，但也能通过改变单元结构之间的频率响应交并关系，在保持原有滤波响应的基础上改变其滤波带宽、中心频率等特性，因而我们提出基于 lattice 结构实现微波光子射频前端中的可重构矩形光滤波器[16]。

借鉴数字滤波器设计理论，矩形数字滤波器需要满足特定的零极点分布。在常见的数字滤波器中，椭圆滤波器具有最小的过渡带宽，在相同阶数下具有更好的矩形系数。当椭圆滤波器阶数为五阶时，其过渡带宽与带宽的比例可以基本满足对于矩形滤波的需要。五阶椭圆滤波器的零极点分布如图 10 所示，包含五个零点和五个极点。因此我们选择具有丰富零极点自由度的 RAMZI 作为基本单元结构来逼近椭圆滤波器。



(a)　RAMZI 单元的结构示意图



(b)　单元 RAMZI（$r_1=0.361$，$r_2=0.837$）和 5 阶椭圆数字滤波器的传输响应和零极点分布

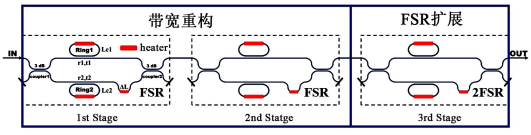
图 10　RAMZI 单元结构示意图及测试结果

对于如图 10 所示的 RAMZI 结构，当微环的周长为 MZI 臂长差的两倍时，其可以抽象为一个五阶数字滤波器，其传输函数如下：

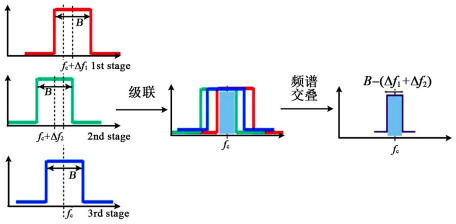
$$H_{\mathrm{RAMZI}}(z)=\frac{1}{2}\left(\frac{r_1+a^2z^{-2}}{1+r_1a^2z^{-2}}-\frac{r_2+a^2z^{-2}}{1+r_2a^2z^{-2}}z^{-1}\right)=\frac{\sum_{r=0}^{5}b_rz^{-r}}{1+\sum_{k=1}^{4}a_kz^{-k}} \tag{3}$$

RAMZI 的零极点分布仅由两个微环的耦合系数(r_1,r_2)所决定。我们采用最小二乘法使 RAMZI 的零极点分布逼近五阶椭圆数字滤波器的零极点分布。此时,两个微环耦合系数确定为 0.361 和 0.837,如图 10 所示。

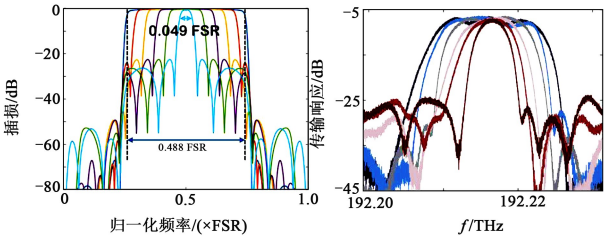
三级级联 RAMZI 结构如图 11 所示。通过改变前两级级联单元的交叠范围即可以实现带宽的重构,其 3 dB 带宽可以在 0.049 FSR 到 0.488 FSR 之间任意连续调谐。在此基础上,进一步级联第三级 RAMZI 结构。第三级 RAMZI 的 FSR 为前两级 RAMZI 的两倍,则整体结构的 FSR 和处理带宽也将扩大为两倍。对于上述结构,我们在低损氮化硅平台上进行了实验验证,其中 RAMZI 单元的两臂臂长差为 5 990 μm。在实验中,实现了 3 dB 带宽在 4.1~14.1 GHz 连续重构的矩形光滤波器,且该结构的片上损耗低于 4 dB。



(a) 结构示意图



(b) 带宽重构原理示意图



(c) 带宽重构仿真结果 (d) 带宽重构实验结果

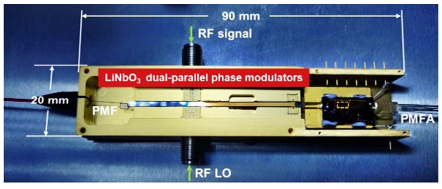
图 11 三级级联 RAMZI 结构示意图及测试结果

2 基于混合集成的微波光子射频前端微系统

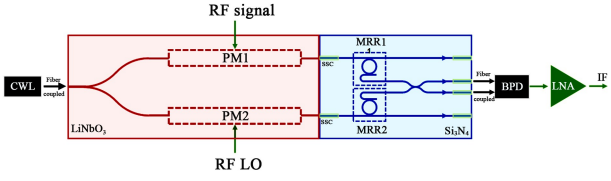
2.1 基于铌酸锂调制器芯片和氮化硅芯片混合集成的微波光子射频前端

图 12 展示了铌酸锂芯片和氮化硅芯片混合集成的微波光子射频前端模块[17]。整个前端系统由外接的体光源、铌酸锂双平行相位调制器芯片、氮化硅滤波器芯片以及平衡探测器和后续的低噪声放大器组成。首先,低噪声大功率(20 dBm)的光载波通过光纤耦合进入铌酸锂调制器芯片后被等分成两份,分别送入位于同一块铌酸锂芯片上的两个独立的相位调制器。其中一路光载波被射频输入信号调制,而另一路光载波被射频本振信号调制。两个调制器输出的微波光子调制信号通过芯片边沿耦合的方式送入氮化硅芯片。其中每一路光载波被信号和本振调制后产生的一阶边带分别被一个光带通滤波器滤出,耦合之后通过光纤输出到平衡探测器进行混频,混频后产生的中频信号再通过一个低噪声放大器进行放大。

铌酸锂芯片上集成了双平行相位调制器,而氮化硅芯片上集成了边沿耦合器、光滤波器和耦合器等结构。铌酸锂芯片和氮化硅芯片通过波导端面直接耦合集成在一起。得益于氮化硅芯片上的边沿耦合器,其耦合损耗只有约 2 dB。封装好的模块体积为 18 cm^3。



(a) 实物图



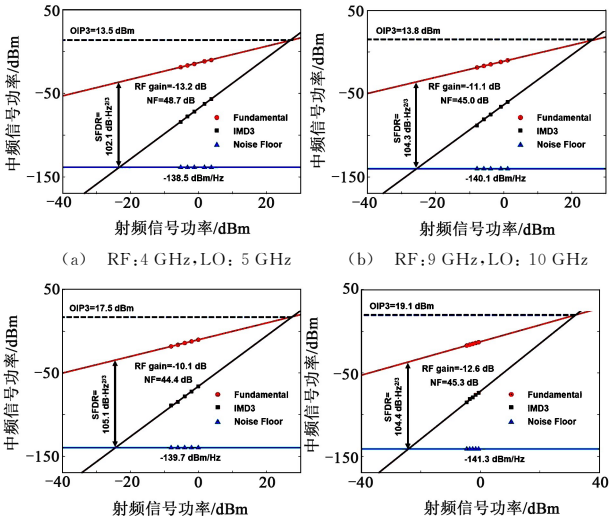
(b) 原理图

图 12 铌酸锂芯片和氮化硅芯片混合集成的微波光子射频前端的实物图和原理图

该微波光子射频前端模块作为接收机能对 4~20 GHz 的微波信号进行全波段下变频接收,其中调制器工作带宽大于 20 GHz,瞬时带宽约为 4 GHz。通过双音信号测试(见图 13),该模块的链路增益约为-10 dB,噪声系数约为 45 dB,无杂散动态范围大于 100 dB·$Hz^{2/3}$。鉴于该模块中芯片之间引入的耦合损耗很低,其链路指标可以与无光放大的微波光子射频前端光纤系统相比拟。

近年来,铌酸锂薄膜波导引起了研究人员的广泛关注。相比于铌酸锂晶体调制器,铌酸锂薄膜调制器不仅保持了调制线性度高的优点,而且结构紧凑、带宽充裕、光电转化效率高[18]。目前有研究表

明，随着波导刻蚀工艺的进步，铌酸锂薄膜波导的损耗有望大幅降低[19]，甚至接近氮化硅波导水平。届时，光子信号处理单元也可以在铌酸锂平台上实现，以进一步减小混合集成系统的复杂度。因此，该混合集成微波光子射频前端架构中的调制器未来可以集成到铌酸锂薄膜平台。



(a)　RF：4 GHz，LO：5 GHz　　(b)　RF：9 GHz，LO：10 GHz

(c)　RF：14 GHz，LO：15 GHz　　(d)　RF：19 GHz，LO：20 GHz

图 13　模块在不同频段的双音信号测试结果

2.2　基于 InP 激光器芯片和 SOI 芯片混合集成的微波光子射频前端

在上文铌酸锂调制器芯片和氮化硅芯片混合集成的方案中，铌酸锂晶体调制器尺寸较大，限制了模块的整体体积，而且光源和探测器这两个核心器件并没有被集成进去。为了实现微波光子射频前端芯片级的全集成，本课题组与上海交通大学和北京大学等单位合作又提出了 InP 激光器芯片和 SOI 芯片混合集成的方案[20]。其中高速相位调制器、光滤波器、高速探测器和边缘耦合器等器件被单片集成在 SOI 芯片上，而光源部分采用商用的大功率(17 dBm)分布反馈式(DFB)半导体激光器芯片。DFB 激光器芯片和 SOI 芯片通过双微透镜的方式耦合在一起。两个微透镜之间插入微型保偏隔离器，以隔绝后端 SOI 芯片内部引入的微弱反射，保证激光器正常工作。通过优化耦合结构，DFB 激光器芯片和 SOI 芯片的耦合损耗为 3.5 dB，其中 1 dB 的损耗由隔离器引入。两个芯片作为一个整体封装在基板上，并通过半导体制冷器来稳定系统的整体温度。除此之外，调制器和探测器也通过高频电路板和金丝键合封装到高频管壳内。综上，实现了一个核心光电元件全集成的微波光子接收机模块，也是首个已报道的芯片级全集成的微波光子射频前端模块。模块原理示意图如图 14 所示。该模块的体积仅为 6 cm^3，仅为目前同类研究产品的 1/30[8]。除此之外，该模块的工作功率仅为 1.2 W，相比体器件光纤系统减小了约两个量级。

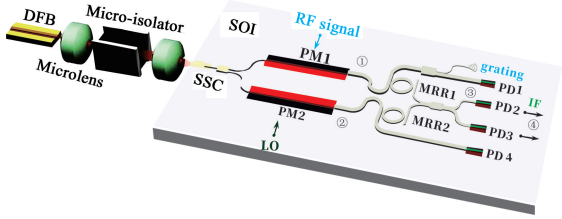
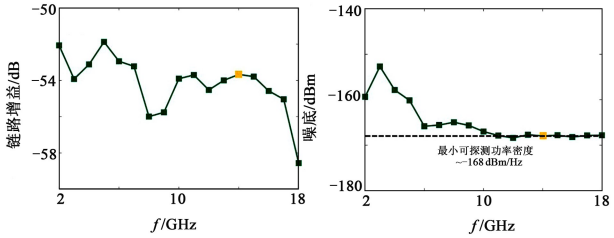


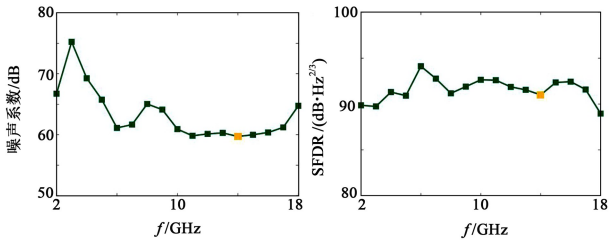
图 14　基于 InP 激光器芯片和 SOI 芯片混合集成的微波光子射频前端模块原理示意图

在封装好的微波光子射频前端模块中，相位调制器的电光调制带宽约为 18 GHz，其半波电压约为 11 V。光电探测器的光电探测带宽大于 20 GHz，同时其响应度约为 1 A/W。由于 SOI 芯片上的光信号处理器带宽为 4.74 GHz，微波光子射频前端的瞬时带宽也为 4.74 GHz。光信号处理器的调谐效率约为 1.4 GHz/mW，热光响应时间约为 66 μs，这两者分别决定了模块在工作频段内间的切换功率和速度。

利用双音信号实验测试了该模块的链路指标，如图 15 所示。当工作在 2～18 GHz 的频段时，该模块的链路增益为－52～－58 dB，噪声系数为 60～75 dB，无杂散动态范围(SFDR)介于 90～95 dB·$Hz^{2/3}$。与基于铌酸锂调制器芯片和氮化硅芯片混合集成的微波光子射频前端相比，该模块的链路指标存在不同程度的降低。尽管由于在该方案中使用了更少的耦合结构，使得整体链路的耦合损耗有所降低，但是链路增益仍然降低了 15 dB。其中有三个主要原因：首先，与上文的平衡探测相比，单探测器的方案损失了至少 6 dB 的射频增益；其次，DFB 激光器芯片输出光功率约为 17 dBm，相比于上文的体激光器光功率较低；最后，SOI 调制器的损耗较大，造成链路增益的降低。因此，为了进一步提高该模块的性能指



(a)　链路增益　　(b)　噪底

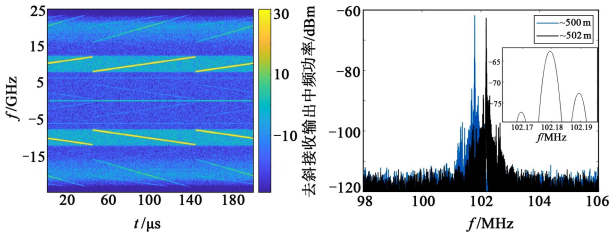


（c） 噪声系数 （d） SFDR

图 15 微波光子射频前端模块在 2～18 GHz 工作频段内的链路指标

标，可以增大激光器芯片的功率和进一步降低链路中的光损耗。

我们还在系统层面验证了该前端模块对于宽带线性调频雷达信号的去斜接收功能。搭建了基于光纤延时的雷达目标模拟器，即把任意波形发生器产生的宽带雷达信号调制到光载波上，并分为两路在光域进行传播。其中一路直接下变频到微波域作为本振信号，另外一路经过 500 m 光纤延时后下变频到微波域模拟雷达回波信号。图 16(a)展示了模拟的雷达回波信号，其带宽为 4 GHz，脉冲宽度为 100 μs，同时保持了良好的线性度。图 16(b)为前端模块输出的中频去斜接收信号。当光纤延迟增加 2 m 之后，中频信号的频率增加 390 kHz，测距精度符合理论预期。这说明该全集成的微波光子射频前端模块具有对宽带雷达信号进行高精度去斜接收的能力。



（a） （b）

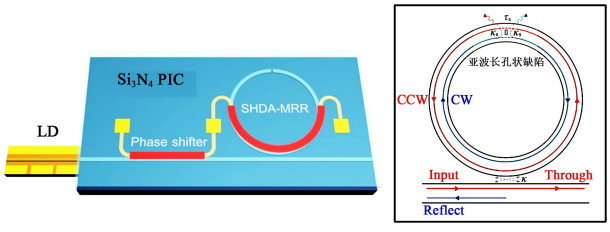
图 16 基于光纤延时的雷达目标模拟器测试结果。(a)模拟的线性调频雷达回波信号；(b)前端模块输出的去斜接收中频信号

2.3 基于混合集成的低噪声、大功率、抗反射光源模块

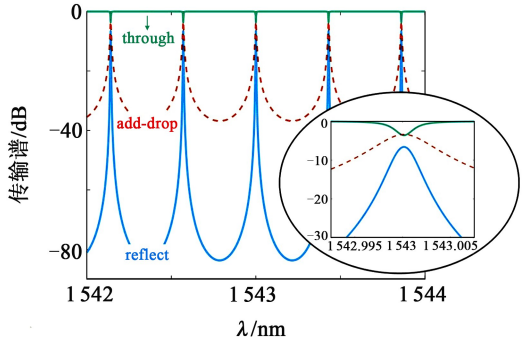
在微波光子射频前端中，低噪声的光源意味着更低的噪声系数和更大的动态范围，会相应提高射频链路的性能。由于光电探测器的平方检波特性，链路的射频损耗和光损耗是平方关系。因此，光源功率越大，链路增益就越高。对于微波光子射频前端，低噪声、大功率噪声的光源非常重要。在集成微波光子射频前端中，半导体激光器因其易于集成已成为首选。目前商用的半导体激光器功率大概都在 50～200 mW，已能满足系统基本需求；然而它们的线宽约在数百千赫兹量级，相对强度噪声（RIN）约为－150 dBc，距离系统性能目标仍存在差距。因此，半导体激光器的频率噪声和强度噪声均有待进一步优化。

对于半导体激光器，其噪声的主要来源是自发辐射[21]。一方面，不可避免的自发辐射光场的随机相位会叠加在激光器产生的相干光场上，进而直接恶化频率噪声；另一方面，自发辐射的光场会同时影响腔内光子密度，进而改变腔内载流子的密度，导致腔体的折射率发生改变，引入额外的频率噪声。在这个过程中，光子密度的波动反映为输出光功率的波动，可以用 RIN 来表示。因此，本课题组针对混合集成微波光子射频前端系统，提出利用片上反馈腔引入自注入锁定效应来抑制自发辐射[22]，进而减少半导体激光器的频率和强度噪声。

如图 17 所示，片上外腔反射镜与上文介绍的亚波长缺陷微环谐振腔类似，不同之处在于此处采用的微环谐振腔基于单臂耦合的 all-pass 结构。在亚波长缺陷微环反射镜（SHDA-MRR）中，通过在微环谐振腔波导上刻蚀出一个孔状缺陷，相反旋向的模式被激励起来。两种旋向的模式通过相位匹配耦合在一起，进而实现反射镜的效果。利用传输矩阵



（a） 结构示意图

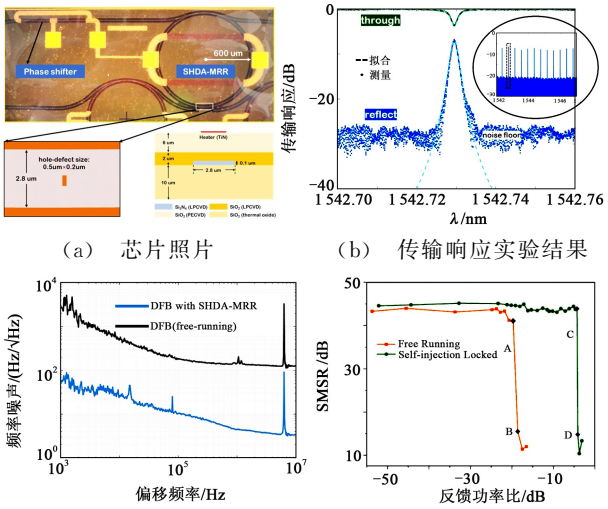


（b） 传输响应仿真结果

图 17 基于 SHDA-MRR 的混合集成低噪声光源模块的结构示意图及传输响应仿真结果

法，我们对 SHDA-MRR 的传输谱进行了仿真。相比于普通的 add-drop 型微环反射镜构型，SHDA-MRR 具有反馈延时大，谐振峰频率响应陡峭这两个优点，而这两者都会增强自注入效应对于噪声优化的效果。一方面，增强的反馈延时极大地延长了复合腔的光子寿命；另一方面，更陡峭的频率响应增强了频率锁定效应，使光场强度的负反馈同时可以促进激光器的频率稳定。除此之外，通过控制缺陷的尺寸，可以准确设计反射镜的反馈响应，来使该反馈腔引入的注入锁定的损耗较小。

首先在 100 nm 氮化硅平台上制造了该亚波长缺陷微环反射镜（SHDA-MRR）结构，如图 18 所示。该反射镜的 3 dB 带宽为 244 MHz，引入的反馈延时约为 1.7 ns，其频率响应的陡峭度最大在偏离谐振峰 6 dB 处可达 5 900 dB/nm，均约为普通 add-drop 型微环反射镜的两倍。我们利用该反射镜验证了其对于激光器噪声的优化效果。如图 18(c)所示，激光器的频率噪声被抑制了三个量级，激光器的本征线宽仅为 34.2 Hz。同时，其 RIN 也由－150 dBc 降低至－155 dBc 以下。除此之外，该反射镜结构仅仅引入了 1 dB 的片上损耗，片上功率达到了 14 dBm 以上（耦合损耗约 2 dB），避免了光功率损失过多造成的链路增益降低。



(a)　芯片照片　　(b)　传输响应实验结果

(c)　噪声优化效果　　(d)　抗反射效果

图 18　SHDA-MRR 芯片照片及相关测试结果

值得注意的是，由于主动引入了强自注入锁定效应，该混合集成的光源模块架构除了具有低噪声的优势外，还体现出了良好的抗反射效果。实验显示，当后端系统引入的反射比小于－5 dB，该光源模块均能正常工作[23]。利用这种无磁性的光源隔离方案，就不需要在激光器芯片和后端芯片之间插入光隔离器，便于构建更为紧凑简洁的混合集成微波光子微系统。

3　基于差分架构的微波光子射频前端信号处理的频率漂移抑制

在集成微波光子射频前端中，激光器的频率漂移和光滤波器的频率漂移最终都会叠加反映到微波光子信号处理的频率漂移上。激光器中心波长的温度漂移约为 100 pm/K，SOI 波导和氮化硅波导的温度漂移分别为 60 和 15 pm/K 左右。因此，即便微波光子射频前端中每个部分的温度漂移都可以被长时间控制在 0.1 K 以内，微波光子信号处理的频率漂移仍能高达百 MHz 到 GHz 量级。如此显著的频率漂移最终都会反映到微波域上，这也阻碍了微波光子射频前端的实际应用。

一个直观的解决方案是分别抑制激光器和光滤波器的频率漂移。对于激光器，我们可以利用外部主动反馈环路，将激光器的频率锁定在片上的基准腔上[24]。上文提到的自注入锁定也相当于是用光域的负反馈原理，把激光器的频率锁定在片上的反射镜上。对于光滤波器来说，一种方案是利用具有负温度系数的材料作为波导包层[25]，使得模式的有效折射率呈现出与温度无关的特性。另外，某些特殊结构设计也可以实现温度无关的中心频率，比如温度不敏感的 MZI 结构[26]。然而，在这些方案中，片上负反馈锁定和负温度系数材料需要复杂的结构或工艺，而利用结构设计实现温度不敏感又缺乏通用性。

我们提出了一种基于差分架构的微波光子频率漂移抑制方案[27]，如图 19 所示。其核心思想是不单独抑制激光器和光滤波器的频率漂移，而是通过让激光器和光滤波器的频率漂移保持相同，等效把微波域的频率漂移抵消掉。该方案需要在光滤波单元的旁边级联一个高 Q 微环谐振腔，作为频率跟踪单元来监控激光器的频率漂移。首先，在频率跟踪单元上施加一个小信号来调制其中心频率，那么光载波经过该频率跟踪单元后的光功率也会被调制。探测到的光电流信号与本振信号被送入锁相放大器中进行检波，则可以得到一个误差信号。基于该误差信号和 PID 反馈控制环路即可以使频率跟踪单元时刻监控光载波的频率漂移，同时将施加在频率

跟踪单元上的实时调谐量加载到光滤波单元上。由于这个实时调谐量反映了光载波和片上频率跟踪单元的频率漂移差量，所以相当于同时对光滤波单元和光载波的频漂进行了补偿，即实现了等效的频率漂移抑制。在该方案中，差分思想体现在两个方面：第一，主动施加的实时调谐量补偿了激光器和光滤波单元之间的频率漂移差量；第二，由于光滤波单元和频率跟踪单元处于同一芯片上，它们的温度漂移可以通过差分的形式被抵消掉。

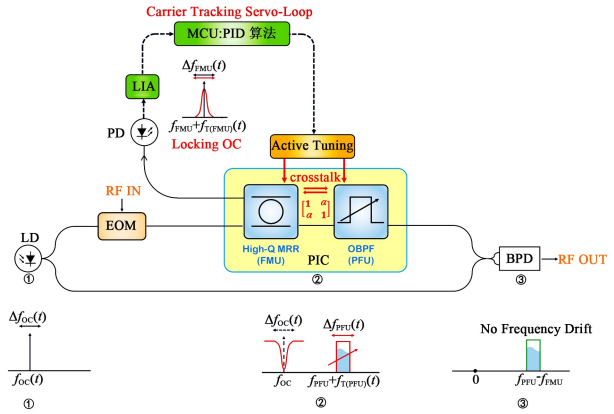
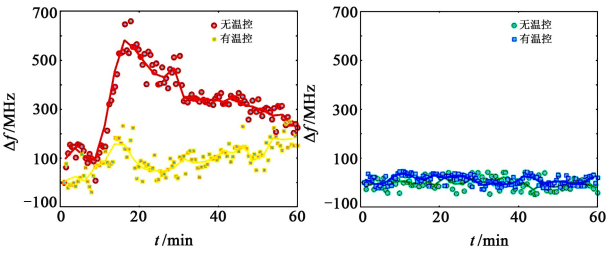


图 19 基于差分架构的微波光子频率漂移抑制方案

在实验中，我们在四种不同的条件下，观测微波光子信号处理的中心频率在一个小时之内的变化。如图 20 所示，当差分抑制架构和温度控制模块同时打开时，微波光子信号处理的频率漂移被控制在 74 MHz 以内；而当差分抑制反馈环路关闭后，频率漂移则恶化为 288 MHz。类似地，当温度控制模块不工作时，差分抑制架构仍能很好地抑制频漂。这不仅说明了所提出差分架构的有效性，同时也说明该架构能减小对于温度控制的依赖。该频率漂移抑制方案不仅与上文提到的光信号处理器设计和混合集成系统架构完全兼容，而且其中的频率跟踪单元还可以同时作为载波抑制滤波器，以减小残留光载波进入光电探测器额外引入的噪声。



(a) 无差分反馈控制 (b) 有差分反馈控制

图 20 差分反馈控制环路关闭及开启下的微波光子中心频率漂移

4 未来展望

目前虽然有多种比较成熟的光子集成平台，但受限于各平台不同的物理性质和加工工艺，没有单一光子集成平台的光电器件能完全满足集成微波光子射频前端对于系统性能的要求。Ⅲ-Ⅴ平台的激光器和探测器的性能十分优异，然而其无源波导损耗较大；铌酸锂薄膜平台的调制器在带宽、调制效率和线性度等指标上有显著优势，氮化硅平台能够实现极低损耗的波导，然而这两者却不适合集成无源器件；SOI 平台虽然能够集成除激光器以外的所有光电元件，但多数器件的性能仍是乏善可陈。因此，既然单一集成平台难以构建高性能的集成微波光子射频前端系统，我们提出综合各个集成平台不同的优势，将不同芯片平台上的单元器件通过混合集成的形式构成一个微系统。其中，激光器和探测器采用Ⅲ-Ⅴ芯片，调制器集成在铌酸锂薄膜芯片上，而光信号处理单元则基于低损氮化硅芯片来实现。不同的集成平台通过芯片边沿耦合或微透镜耦合的方式混合集成在同一基底上。这种基于多芯片平台混合集成的系统架构有望在未来进一步提高微波光子射频前端的系统性能。

参考文献：

[1] 张明友. 雷达-电子战-通信一体化概论[M]. 北京：国防工业出版社，2010.
Zhang Mingyou. Introduction to Radar-Electronic Warfare-Communication Integration [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2010.

[2] Sabbagh S, Mafinezhad K. 4～6.3 GHz microwave tunable filter employing RF MEMS switches[C]// 6th Inter. Symp. on Telecommunications (IST), 2012: 37-41.

[3] Kosugi T, Shibata T, Enoki T, et al. A 120 GHz millimeter-wave MMIC chipset for future broadband wireless access applications[C]// Microwave Symposium Digest, 2003 IEEE MTT-S International, 2003, 1: 129-132.

[4] 尹纯静. 面向一体化电子系统应用的宽带通用射频光前端技术[D]. 北京：北京邮电大学，2019.
Yin Cunjing. Broadband universal RF optical front-end technology for integrated electronic system applications [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.

[5] Marpaung D, Roeloffzen C, Heideman R, et al. Integrated microwave photonics[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(4): 506-538.

[6] Marpaung D, Yao J, Capmany J. Integrated microwave photonics[J]. Nature Photonics, 2019, 13(2): 80-90.

[7] Fandino J S, Munz P, Domenech D, et al. A monolithic integrated photonic microwave filter[J]. Nature Photonics, 2017, 11(2): 124-129.

[8] Paollela A, Desalvo R, Middleton C, et al. Hybrid integration of RF photonic systems[J]. J. of Lightwave Technol., 2018, 36(21): 5067-5073.

[9] Yu H, Chen M, Li P, et al. Silicon-on-insulator narrow-passband filter based on cascaded MZIs incorporating enhanced FSR for downconverting analog photonic links[J]. Opt. Express, 2013, 21(6): 6749-6755.

[10] Yu H, Chen M, Guo Q, et al. Si_3N_4-based integrated optical analog signal processor and its application in RF photonic frontend[J]. IEEE Photonics J., 2015, 7(5): 1-9.

[11] Li Jiachen, Yang Sigang, Chen Hongwei, et al. Subwavelength hole defect assisted microring resonator for a compact rectangular filter[J]. Opt. Lett., 2020, 45(11): 3123-3126.

[12] Li A, Van Vaerenbergh T, De Heyn P, et al. Backscattering in silicon microring resonators: a quantitative analysis[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(3): 420-431.

[13] Dong P, Feng N N, Feng D, et al. A tunable optical channelizing filter using silicon coupled ring resonators[C]// Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2010: CThAA6.

[14] Daniel Pérez, Gasulla I, Crudgington L, et al. Multipurpose silicon photonics signal processor core[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 636.

[15] Djordjevic S S, Luo L W, Ibrahim S, et al. Fully reconfigurable silicon photonic lattice filters with four cascaded unit cells[J]. Photon. Technol. Lett., 2011, 23(1): 42-44.

[16] Li J, Yang S, Chen H, et al. Reconfigurable rectangular filter with continuously tunable bandwidth and wavelength[J]. IEEE Photonics J., 2020, 12(4): 6601309.

[17] Li Jiachen, Yang Sigang, Chen Hongwei, et al. Hybrid microwave photonic receiver based on integrated tunable bandpass filters[J]. Opt. Express, 2021, 29(7): 11084-11093.

[18] Zhu Di, Shao Linbo, Yu Mengjie, et al. Integrated photonics on thin-film lithium niobate[J]. Adv. Opt. Photon., 2021, 13(2): 242-352.

[19] Zhang M, Luke K, Kharel P, et al. Wafer-scale low-loss lithium niobate photonic integrated circuits[J]. Opt. Express, 2020, 28(17): 24452-24458.

[20] Li Jiachen, Yang Sigang, Chen Hongwei, et al. Fully integrated hybrid microwave photonic receiver[J]. Proc. SPIE, 2021: 1205751.

[21] Li Jiachen, Zhang Baoyu, Yang Sigang, et al. Robust hybrid laser linewidth reduction using Si_3N_4-based subwavelength hole defect assisted microring reflector[J]. Photonics Research, 2021, 9(4): 558-566.

[22] Tran M A, Huang D, Bowers J E. Tutorial on narrow linewidth tunable semiconductor lasers using Si/Ⅲ-Ⅴ heterogeneous integration[J]. APL Photonics, 2019, 4: 111101.

[23] Tang L, Li J, Yang S, et al. A method for improving reflection tolerance of laser source in hybrid photonic packaged micro-system[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2021, 33(9): 465-468.

[24] Felipe D D, Happach M, Kleinert M, et al. Polymer-based integrated tuneable laser with on-chip wavelength locker[C]// European Conf. on Optical Communication (ECOC), 2016: 1-3.

[25] Kokubun Y, Yoneda S, Matsuura S. Temperature-independent optical filter at 1.55 μm wavelength using a silica-based athermal waveguide[J]. Electron. Lett., 1998, 34(4): 367-369.

[26] Mutsunori Uenuma, Teruaki Motooka. Temperature-independent silicon waveguide optical filter[J]. Opt. Lett., 2009, 34(5): 599-601.

[27] Li J, Liu Z, Geng Q, et al. Method for suppressing the frequency drift of integrated microwave photonic filters[J]. Opt. Express, 2019, 27(23): 33575-33585.

作者简介：

李佳琛(1994－)，男，博士研究生，主要研究方向是硅基光子集成微系统技术、集成微波光子技术和集成窄线宽激光器技术；

陈明华(1971－)，男，博士，长聘教授，博士生导师，曾于 2009～2011 年担任麻省理工学院电子学研究所访问教授，主要研究方向为硅基光子集成微系统技术、光通信技术与集成微波光子技术，主持完成的项目获国家科技进步奖二等奖 1 项、省部级科技进步奖多项，是中国光纤在线共创人。