动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.01.001

硅基微波光子滤波器的研究进展

陶源盛[1]，王兴军[1,2,3]*，胡薇薇[1]

（北京大学 1. 信息科学技术学院 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室；
2. 纳光电子前沿科学中心，北京 100871；3. 长三角光电科学研究院，江苏 南通 226010）

摘　要： 微波滤波器是无线通信、电子雷达等射频系统中的关键组件之一。硅基微波光子滤波器具有集成化、带宽大、可调谐性强、抗电磁干扰等显著优势，近年来得到了广泛的关注与研究。文章从微波光子滤波器的工作原理出发，分别综述了非相干型与相干型两类硅基微波光子滤波器的最新研究进展，并分析了当前面临的问题与挑战。最后，对硅基微波光子滤波器的发展现状进行总结，并对下一步的研究方向进行了展望。

关键词： 硅基光电子学；集成；微波光子；滤波器

中图分类号： TN713.1　**文章编号：** 1001－5868(2021)01－0001－10

Recent Progresses of Silicon Integrated Microwave Photonic Filters

TAO Yuansheng[1], WANG Xingjun[1,2,3], HU Weiwei[1]

(1. State Key Laboratory of Advanced Optical Communications System and Networks, School of Electronics Engineering and Computer Science; 2. Frontiers Science Center for Nano-optoelectronics, Peking University, Beijing 100871; 3. Peking University Yangtze Delta Institute of Optoelectronics, Nantong 226010, CHN)

Abstract: Microwave filter is the key building block in the radio frequency (RF) system such as wireless communication and radar. Recently, silicon integrated microwave photonic filters (MPF) have been a hot research topic due to their capacities on integration, large bandwidth, excellent tunability and immunity to electromagnetic interference. In this paper, the operation principle of MPF is introduced firstly. Then, the latest research progresses of incoherent and coherent silicon integrated MPF are reviewed, and also the problems and challenges are analyzed. Finally, the main achievements of silicon integrated MPF up to now are summarized, and the next research orientations are discussed.

Key words: silicon photonic; integrated; microwave photonic; filter

0　引言

微波滤波器是射频系统中接收前端部分的核心器件，用于从背景噪声中滤出目标频段信号或抑制射频干涉产生的较强干扰信号，被广泛应用在无线通信、卫星通信、电子雷达等现代微波系统中。传统的微波滤波器是在电域内实现信号滤波，受电子瓶颈所限，通常工作频段范围窄、可调谐性差、体积尺寸较大，难以满足未来微波系统对更高处理频段和更大通信容量的迫切需求[1-2]。微波光子滤波器（Microwave Photonic Filter，MPF）是将信号从微波域上变频到光域，利用光电子器件在光域内实现滤波处理操作，因此可以打破电子瓶颈的限制，具有高带宽、良好的可调谐性、灵活可重构、抗电磁干扰等显著优势，被认为是可应用在下一代无线射频系统中的关键技术之一。

过去关于微波光子滤波器的研究，大部分是基于光纤连接的分立光电子器件搭建系统，虽然可以

收稿日期：2020－12－08.

基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFB2201704)；国家自然科学基金项目(61635001)；北京市重点研发计划项目(Z191100004819006).

* **通信作者：**王兴军　**E-mail：**xjwang@pku.edu.cn

发挥出微波光子滤波器所固有的高带宽、可调谐、对电磁干扰不敏感的优势，但是仍存在系统体积和重量大、功耗和成本高、稳定性差等问题。这些问题在面向通信卫星、机载雷达等对载荷要求极高的系统应用时影响将会更加明显[3]。近年来，随着集成光电子工艺与技术的蓬勃发展，研究者们逐步将微波光子滤波器系统中的核心光电子器件，包括激光器、调制器、无源光滤波器、探测器等集成到光芯片上，衍生出集成微波光子滤波器(Integrated Microwave Photonic Filter，IMPF)这一新兴的研究方向。2009年，美国贝尔实验室的研究者们首次报道了硅(Si)基片上低损耗微环谐振腔的可调谐带陷型微波光子滤波器，实现了910 MHz的滤波带宽与2～15 GHz的频率调谐范围[4]。随后，利用铟磷(InP)基的片上级联微环和级联Mach-Zehnder(MZ)干涉仪结构的微波光子滤波器也相继在实验上实现[5-6]。到2016年，西班牙瓦伦西亚理工大学的Capmany教授团队实现了世界上第一个全集成的微波光子滤波器，成功地将微波光子滤波器系统所需的全部器件，即激光器、调制器、光滤波器和探测器集成在单颗InP芯片上[7]。截至目前，集成微波光子滤波器虽然得到了广泛的研究与长足的发展，但是其滤波性能距离实用化仍存在较大差距，整体尚处于前沿探索的阶段。

当前，集成微波光子滤波器主要基于铟磷、硅和氮化硅(Si_3N_4)三个材料平台实现[8]。InP基平台的工艺发展最为成熟，可以同时制备出有源器件(激光器、调制器、光放大器和探测器)和无源器件(光波导)，但是存在损耗高(1.5～3 dB/cm)、工艺复杂、成本高、CMOS工艺不兼容等问题。而硅基和氮化硅基材料平台[9]，可以利用现有的成熟微电子集成工艺进行器件制备，波导传输损耗低(Si：0.1～2 dB/cm；Si_3N_4：0.01～0.2 dB/cm)、制备成本低、易于量产，而且与CMOS标准工艺兼容良好，具有与驱动电路单片集成的潜力[10]，但是也存在无法实现硅基激光器的问题。

本文重点关注硅基集成微波光子滤波器，从微波光子滤波器的基本工作原理出发，详细综述了硅基非相干型微波光子滤波器和相干型微波光子滤波器的最新研究进展，并分析了当前面临的问题与挑战。最后，对硅基微波光子滤波器的发展现状做了简要总结，并对其未来发展方向进行了展望。

1 微波光子滤波器的原理

微波光子滤波器的基本系统架构如图1所示。激光器产生连续光或脉冲光，通过高速电光调制器调制从而将射频输入电信号加载至光频段上，然后基于光处理器对加载有射频输入的光信号进行光域上的处理，通常为光滤波、延迟或波形整形等操作，最后由光电探测器接收，将处理后的光信号还原至电域产生射频输出[11]。依据在光域上进行信号处理方式与原理的不同，可以将微波光子滤波器划分为非相干型滤波器与相干型滤波器两类。

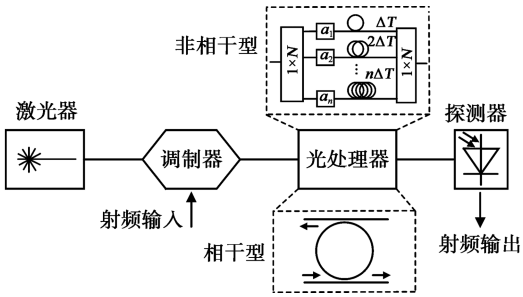


图1 微波光子滤波器的基本系统架构

非相干型微波光子滤波器的滤波性质与光源的相位无关，该类型滤波器通常采用多抽头延迟的结构，与经典离散信号处理中的数字滤波器的架构类似[12]，即将调制上电信号的光载波分成N个抽头，每路抽头经过不同的加权与延迟，然后再将这N路信号合在一起输入探测器中拍频产生输出。非相干型微波光子滤波器在时域上的冲激响应函数$h(t)$可以表达为

$$h(t)=\sum_{n=0}^{N-1}a_n\delta(t-n\Delta T) \tag{1}$$

其中，a_n为抽头系数，ΔT为相邻抽头间的时延差。将时域表达式进行傅里叶变换可以得到频域上的滤波表达式[13]：

$$H(\omega)=\sum_{n=0}^{N-1}a_n e^{-jn\omega\Delta T} \tag{2}$$

根据以上表达式可以看出滤波器的频域响应具有周期性，自由频谱范围(FSR)等于$1/\Delta T$。依据抽头系数a_n的代数形式分为正系数滤波器、负系数滤波器和复系数滤波器。依据抽头数目可分为有限冲激响应(FIR)滤波器和无限冲激响应(IIR)滤波器。非相干型滤波器可以通过调控抽头系数，灵活地实现对滤波带宽、中心频率和滤波波形的调谐，具有很强的重构性和通用性。然而系统搭建较为复杂，实现较高的集成度极具挑战性。

相干型滤波器的滤波特性与光源相位相关，通常系统结构相比非相干型滤波器要简单很多。相干型滤波器由单波长光源产生连续激光，经过调制器加载微波电信号，然后通过预先设计好的光滤波器对加载在光载波上的微波信号进行光域上的滤波操作，最后进入探测器拍频还原出微波信号。可以看出，相干型滤波器实际上是将光滤波器的光域滤波响应直接映射到电域上。该类型的滤波器系统组成较为简单，系统稳定性更高，易于实现较高程度的集成，目前已报道的高集成度片上微波光子滤波器均是基于该类型系统结构。

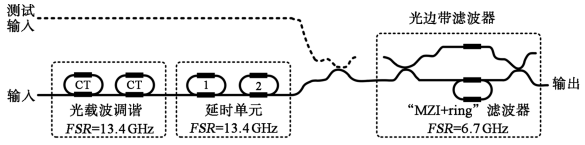
2　非相干型硅基微波光子滤波器

非相干型微波光子滤波器，具体来说有两种主要的实现方式。第一种方案是基于单波长的光源，通过光分束器产生多路抽头，对各路抽头的光强与相位进行加权，并利用光延迟线在抽头间引入延迟差。第二种方案是基于多波长光源或光谱切割后的宽谱光源，一个波长即作为一路抽头，通过可编程光波形整形器（Waveshaper）对各波长光的幅度和相位进行加权，然后经一段色散介质引入抽头间的延迟差。

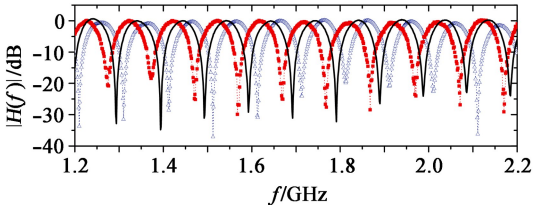
2.1　基于单波长光源的非相干型滤波器

对于单波长的非相干型微波光子滤波器，传统的分立系统通常需要采用不同延迟量的光纤延迟线阵列组合[14]，系统复杂度高且工作稳定性差。硅基光电子集成技术的发展为解决这一难题提供了有效的方案。基于不同设计结构的硅波导可调延迟线器件及延迟线阵列相继被报道，相比于光纤延迟线，光波导延迟线具有尺寸小、可调谐、鲁棒性高、稳定性强等显著优势。

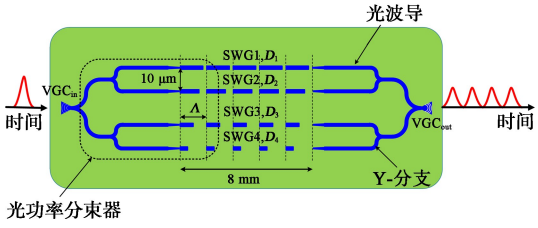
2011 年，Burla 等提出了基于级联微环结构的集成可重构光延迟线，如图 2(a)所示，它由载波分离调谐单元（SCT Unit）、光延迟线（ODL）和光边带滤波器（OSBF）组成[15]。器件基于 CMOS 工艺兼容的 TriPleX 技术制备[16]。基于该可重构光延迟线，搭建了 2 抽头的微波光子滤波器系统，并实现了滤波响应的连续调谐，如图 2(b)所示。然而，基于微环结构的延迟线存在着工作带宽窄的固有缺陷，限制了其在宽带系统中的应用。为提升器件的工作频段范围，Lawrence 等提出了亚波长光栅（Subwavelength Grating，SWG）结构光波导延迟线，器件结构如图 2(c)所示[17]。延迟线的通道数为 4 路，由采用不同占空比等结构参数的 SWG 波导组成，各路 SWG 波导对同一波长光的有效折射率不同，进而产生不同的延迟量。该器件的工作带宽可达几到几十太赫兹，同时具有结构紧凑、设计灵活的特点。2015 年，华中科技大学张新亮课题组报道了硅基集成的 4 抽头 FIR 型滤波器，器件结构如图 2(d)所示[18]，该结构除集成了 4 通道的光延迟线阵列外，还将各路抽头的加权功能也集成在硅芯片上，即利用片上 MZ 热光调制器进行幅度调谐，利用热光相移器进行相位调谐。他们基于该 FIR 滤波器，在实验上成功实现了方波、三角波、锯齿波等多种脉冲波形的产生与射频微分器等多种功能。



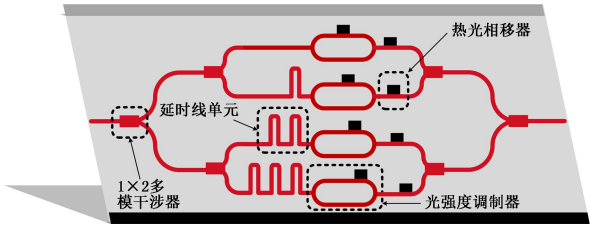
(a)　基于级联微环结构的光延迟线[15]



(b)　2 抽头微波光子滤波器的频率响应[15]



(c)　基于亚波长光栅结构的光延迟线[17]



(d)　硅基集成的 4 抽头 FIR 型滤波器[18]

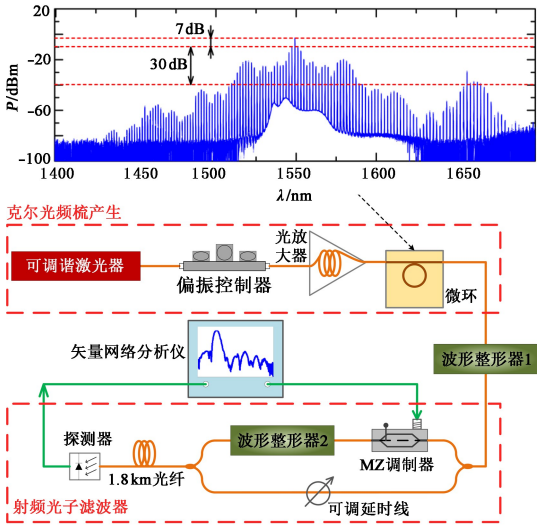
图 2　基于单波长光源的集成非相干型滤波器

2.2　基于多波长光源的非相干型滤波器

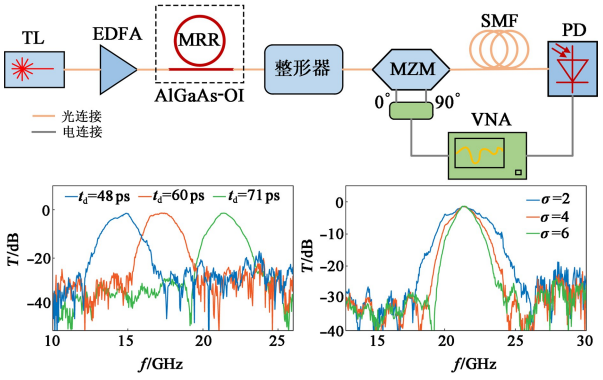
基于多波长光源的非相干型微波光子滤波器，系统组成通常包括多波长光源、光波形整形器、电光调制器、色散介质与光电探测器等五个部分。由于系统链路的复杂度高，目前该类型滤波器在硅基平

台上仅实现了单类器件的部分集成，主要集中在硅基片上的多波长光源、光波形整形器和高色散波导三个研究方向。

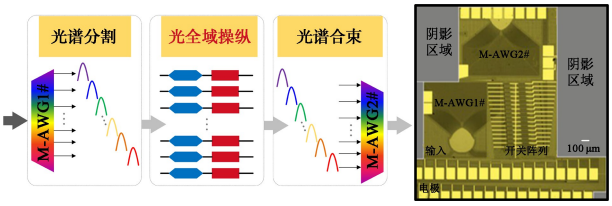
对于多波长光源的产生，传统的分立微波光子滤波器系统通常需要一组激光器阵列，这极大地增大了系统的体积，提高了成本。近年来，基于片上微环谐振腔的非线性克尔光学频率梳的出现，为实现微型化高效率的多波长光源提供了一种理想思路。2014 年，美国普渡大学的 Weiner 教授课题组基于氮化硅微环谐振腔（Microring Resonator，MRR）产生了相干性良好的宽谱克尔光频梳，并将其作为光源搭建了复系数微波光子滤波器系统，如图 3(a)所示[19]。通过波形整形器调谐各路抽头，即各根光梳梳齿的光强度与相位，即可实现对滤波波形的任意重构。然而，其入射进氮化硅微环的泵浦光功率高达 1.43 W，需要借助高功率掺铒光纤放大器（EDFA）实现，增大了系统功耗与复杂度。为解决这个问题，我们课题组提出了基于高效率铝镓砷（AlGaAs）微腔光频梳的滤波器系统，如图 3(b)所



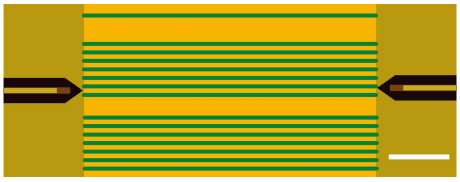
（a） 基于氮化硅微腔光频梳的滤波器系统[19]



（b） 基于铝镓砷微腔光频梳的滤波器系统[20]



（c） 硅基集成的光波波形整形器[23]



（d） 基于光子晶体结构的高色散波导[24]

图 3 基于多波长光源的集成非相干型滤波器

示[20]。凭借 AlGaAs 材料本征的高非线性系数，加上对刻蚀工艺和波导设计的优化，AlGaAs 基微腔此前已实现了低至约 36 μW 的光梳产生阈值功率[21]。利用 AlGaAs 基微环，在约 20 mW 泵浦光功率下，实现了良好的带通滤波性能，其中边模抑制比高于 25 dB，滤波中心频率和滤波带宽均可灵活调谐。

对于光频梳的梳齿整形，传统方案中使用的光波形整形器一般是基于高分辨率固态硅晶体（LCoS）阵列实现的。该类型器件是分立的，因而尺寸较大且机械稳定性差。2016 年，普渡大学 Weiner 课题组率先基于 InP 基工艺实现了片上集成的 32 通道、25 GHz 通道间隔的光波形整形器，并成功演示了其应用于滤波器系统的能力[22]。华中科技大学的王健课题组在硅基平台上实现了 16 通道的光波形整形器，结构如图 3(c)所示[23]，由输入阵列波导光栅（AWG）、强度调制器、相移器阵列和输出 AWG 组成。该器件初步验证了硅基片上光波形整形的可行性，但与商用的分立器件相比，在光插损、分辨率、通道串扰等指标上均存在很大差距。

基于多波长光源的分立滤波器系统，抽头间的固定时延差是通过色散光纤产生的。要实现该类型滤波器的片上集成，就需要制备出高色散的集成光波导以代替色散光纤在系统中的功能。2012 年，Capmany 等报道了片上光子晶体波导的方案，如图 3(d)所示[24]，器件长度为 1.5 mm，插入损耗低于 10 dB，采用 InP 基工艺制备。利用该光子晶体波导代替色散光纤，成功实现了 4 抽头的微波光子滤波器。而在硅基平台上，对于高色散波导的实验研究[25]与仿真设计[26]也取得了一些不错的进展，但

尚未有应用在微波光子滤波器系统中的实验报道。

整体来说，非相干型微波光子滤波器在硅基平台上的集成度不高，目前仅实现了单个器件的片上集成，系统的大部分组件仍采用分立器件。其原因主要有：一是该类型滤波器的系统链路复杂度高，当集成规模较大时，片上的光损耗很高而导致探测器难以响应；二是系统所需的几类关键器件，如高效率的光频梳源、高精度的波形整形器和低损耗大色散的光波导，基于目前的制备工艺实现难度很大。尽管如此，非相干型微波光子滤波器因其良好的可重构性和可调谐性，更适用于复杂多样的微波系统，因而未来仍具有很大的研究意义与价值。

3　相干型硅基微波光子滤波器

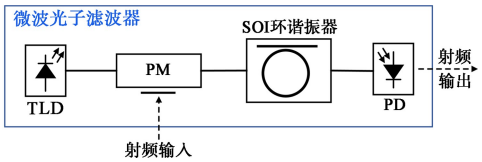
相比非相干型微波光子滤波器，相干型滤波器在硅基平台上的集成研究则更为广泛与深入。由于相干型滤波器的滤波响应与系统中光滤波器的光域频率响应直接相关，因此研究者们首先将关注点集中在实现性能良好的硅基片上光滤波器上。相比于光纤滤波器，硅基片上光滤波器的尺寸更小，且可调谐性强、可动态重构、设计灵活、工作稳定性更好。

构建硅基片上光滤波器目前主要有三种方案：基于片上微环/微盘谐振腔、片上波导布拉格光栅(Waveguide Bragg Grating，WBG)和片上受激布里渊散射(SBS)效应。其中，基于微环/微盘谐振腔的器件结构使用最为广泛。

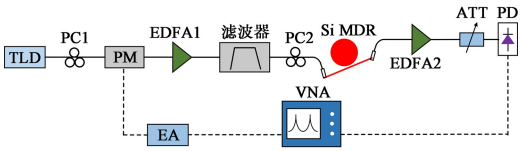
3.1　基于硅基微环/微盘的滤波器

图 4(a)所示为早期报道的一个基于硅基微环的带通滤波器系统[27]，其基本工作原理为：射频电信号通过相位调制器加载到光载波上，产生上下两个反相的微波边带，当利用微环的谐振峰滤除其中一个边带并输入探测器拍频时，即可通过相位调制到强度调制(PM-IM)的转换效应[28]，产生电域上的带通型滤波响应。与此类似，Liu 等将相位调制后产生的双边带信号滤除掉其中一个边带，并利用硅基微盘谐振腔对余下的边带进行滤波，再进入探测器拍频即可实现电域上的带陷型滤波响应[29-30]，如图 4(b)所示。在上述早期研究工作中，微环谐振器的结构和滤波器系统均未经优化，因而存在着滤波带宽较大(约 1 GHz)、抑制比较低、可调谐性差等诸多问题。

为进一步提升硅基片上基于微环的微波光子滤波器的性能指标，研究者们提出了许多卓有成效的优化方案。在优化滤波带宽方面，研究重点集中在降低波导损耗即提升微环的品质因子(Q 值)上。Marpaung 等利用损耗更低的氮化硅微环构建出带陷型滤波器[31]，获得了 247～840 MHz 的滤波带宽、2～8 GHz 的频率调谐范围。2018 年，Qiu 等提出了一种超高 Q 值跑道型硅基微环结构，如图 5(a)所示[32-33]，其中两段长直波导区域采用 2 μm 宽光波导，可有效降低波导侧壁损耗，因而大幅降低了环绕微环一周的损耗因子，将 Q 值提升至 1.14×10^6。基于该高 Q 值的微环，实现了一个带通型的微波光子滤波器，实验测得的滤波带宽约为 170 MHz，抑制比为 26.5 dB，调谐范围为 2～18.4 GHz。采用类似设计思路的高 Q 值硅基微环近年来同样得到了其他研究者的关注，并提出了进一步优化的方法[34]。



(a)　基于硅基微环的带通滤波器[27]



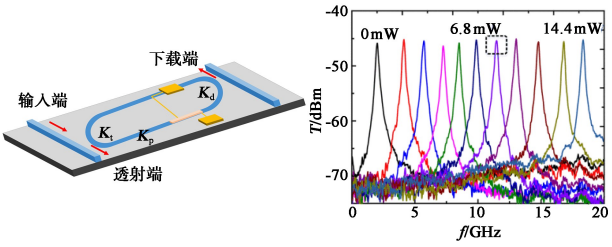
(b)　基于硅基微盘的带陷滤波器[29]

图 4　基于硅基微环/微盘的滤波器系统

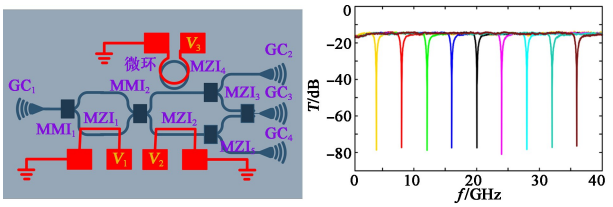
在提升滤波抑制比方面，主要的解决思路是将传统微波光子滤波器中用于提升抑制比的电域或光域相减方案[35]引入到硅基集成滤波器的系统中[36-38]。如图 5(b)所示结构[36]，从耦合光栅输入单边带调制后的光信号，通过调节 MZI_1 上的电压 V_1，实现 MZI_2 两臂的不等比例分光，强度高的一路光利用微环对边带进行滤波，而强度弱的一路光施加一个 π 相移。通过精细调节使微环路滤波后边带剩余光强和弱光一路的边带光强相等，那么两路光在滤波峰处就可以完全反相，实现相减抵消进而获得极高的消光比(大于 60 dB)。Marpaung 等采用类似的相减方式[37]，基于氮化硅微环和受激布里渊散射增益制备了一种兼顾高分辨率和高抑制比的滤波器，其带外抑制比大于 50 dB，同时 3 dB 带宽在 60～220 MHz 范围内可调。

若要在微波系统中完全替代传统的电滤波器，除滤波带宽和抑制比等滤波本身的性能指标外，硅

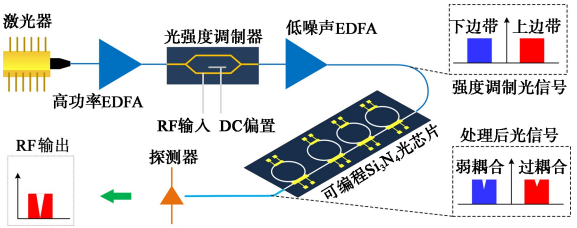
基微波光子滤波器还需要关注其射频(RF)性能[11],具体包括无杂散动态范围(SFDR)、噪声系数和链路增益等三项指标。悉尼大学 Eggleton 课题组首先关注与研究了硅基微波光子滤波器的 RF 性能的优化方法[39-40]。如图 5(c)所示,采用低损耗的氮化硅级联微环作为光滤波器,采用两台 EDFA 增大光芯片的入射光功率和补偿链路光损耗,有效提升了噪声系数和增益两项指标。同时,利用低偏置点(Low-Biased)技术进行电光调制,大幅度地提升了 SFDR 指标。该滤波器最终实现了射频增益为+8 dB、噪声系数为 15.6 dB 以及三阶无杂散动态范围为 116 dB·$Hz^{2/3}$ 的极高 RF 性能[39]。



(a) 窄带滤波器[32]



(b) 高抑制比滤波器[36]



(c) 优化 RF 性能的滤波器[39]

图 5 优化性能指标的滤波器

对于实际微波系统,在提升滤波器性能的同时,往往还需要实现特殊的滤波波形(如平顶滤波)与滤波响应的可重构,以满足特定应用场景的需求。

在常见的洛伦兹或高斯型滤波波形之外,平顶(Flat-Top)滤波在无线通信系统同样有着重要应用价值。实现平顶型微波光子滤波器,即需要实现一个平顶型的光滤波器,最为常用的方案是采用级联耦合微环结构(Coupled Resonator Optical Waveguide,CROW)[46-48]。2019 年,荷兰的研究者 Taddei 等将 8 个氮化硅微环的 drop 端级联起来[41],如图 6 所示,通过热光调谐每个微环的耦合系数与谐振峰位置来满足平顶滤波的条件[49],实现了 72 MHz 带宽、大于 51 dB 带外抑制比的平顶滤波波形。同年,张新亮研究团队采用 10 个硅基微环级联的 CROW 结构,实现了通带带宽在 5.3~19.5 GHz 范围内连续可调的平顶型滤波器[42]。

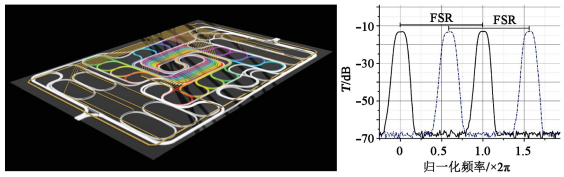


图 6 平顶型滤波器[41]

实现滤波响应可重构的相干型微波光子滤波器,一种思路是设计可重构的光滤波器,即通过将微环、MZ 干涉仪等基本结构组合成网格或阵列[45-48],通过调谐器件组合的不同状态与参数实现滤波响应的重构,进而改变映射到电域上的滤波波形。另一种思路则是通过重构电光调制器对电信号的调制状态,进而改变还原到电域上的滤波波形,这种方法多用于带通滤波与带陷滤波响应之间切换[49-50]。图 7 所示为基于硅基微环的带通/带陷滤波响应可切换的滤波器系统架构[50],通过调整偏振控制器 PC2,可以分别实现不等幅双边带调制和理想的相位调制信号,从而使经过微环滤波后进入探测器拍频出的滤波响应在带通滤波与带阻滤波响应之间切换。

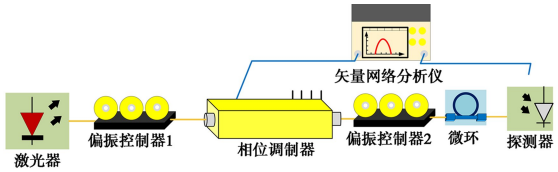


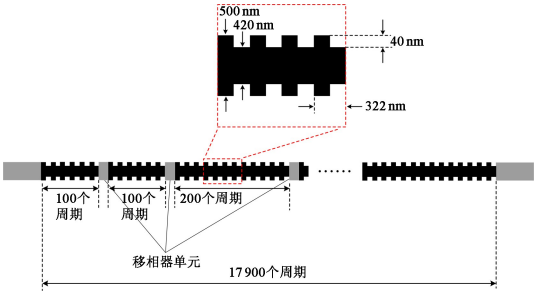
图 7 可重构型滤波器[50]

3.2 基于硅基波导布拉格光栅的滤波器

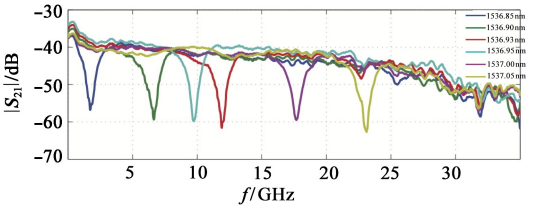
硅基波导布拉格光栅(WBG)是另一种适用于多种集成微波光子信号处理功能的基础器件结构,同样可以应用在微波光子滤波器的系统中。

2014 年,Burla 等首先报道了利用硅基 WBG 实现的带陷型微波光子滤波器[51-52]。其中,WBG 的器件结构与设计参数如图 8(a)所示,采用多项目晶圆(Multi-Project Wafer,MPW)方式在欧洲 IMEC 机构进行器件加工。图 8(b)所示为实验测得的滤波器频率响应,其中心带陷频率可以在 0~20 GHz 范围内连续可调。同样是基于硅基 WBG 结构,Zhang 等[53]利用硅基有源工艺对 WBG 波导

进行掺杂，从而可以通过硅载流子色散效应快速调谐 WBG 波导的有效折射率，实现了可编程式的多用途 WBG，对于实现可重构型滤波器具有重要的参考价值。



（a）　WBG 的结构设计



（b）　基于 WBG 的滤波器响应

图 8　基于硅基 WBG 的微波光子滤波器[51]

硅基波导布拉格光栅的结构紧凑，设计理论简单成熟，且温度敏感性相较于微环/微盘结构更低，是实现硅基微波光子滤波器的理想选择之一。然而，目前受硅波导刻蚀工艺所限，器件的设计性能与实际加工出来的性能存在较大差异，导致滤波器的滤波带宽与抑制比较差。因此，不断优化器件的加工工艺是未来发展的重要任务。

3.3　基于硅基片上 SBS 效应的滤波器

受激布里渊散射（SBS）是介质中光波与声波相互作用所产生的一种非线性光学效应。当入射泵浦光功率较高时，由光波产生的电磁伸缩效应在介质内激发起前向传播的声波，入射光被声波散射而产生后向传播的光波，称为斯托克斯（Stokes）波。SBS 效应由于线宽极窄、频率稳定等显著优势，成为实现超窄带宽微波光子滤波器的最优选择之一，已在硫系玻璃波导中得到了验证[54]。硅材料的受激布里渊增益系数很小，相比硫系波导，构建出微波光子滤波器系统的难度更大。不过，这一难题在 2015 年被 Eggleton 课题组率先攻克，他们提出了图 9 所示的微波光子滤波器系统方案[55]。首先，他们设计了一种部分悬空的硅纳米线波导，这样的结构可以增大硅波导对光场的束缚能力，从而抑制声场从硅波导到二氧化硅基底的泄露，增强了硅波导内的声光相互作用，获得了约 1 dB 的 SBS 增益。同时，基于 3.2 节提到的微波上下边带相减的方式，他们仅利用这 1 dB 的 SBS 增益实现了抑制比达 48 dB 的带陷型滤波，滤波带宽为 98 MHz，是目前在硅基平台上实现的最窄滤波器线宽。

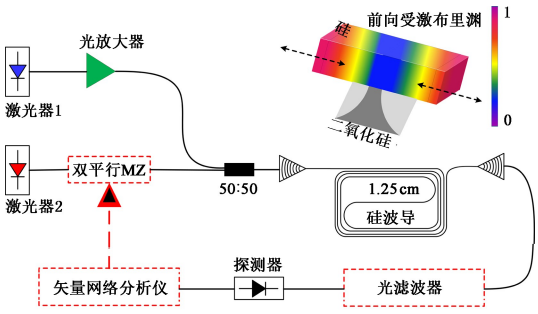


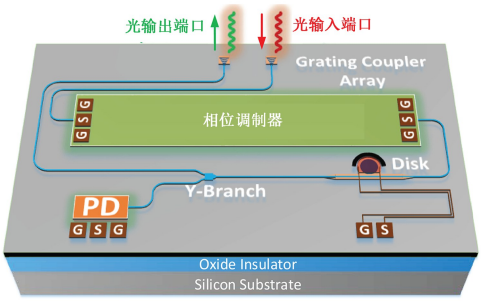
图 9　基于硅基片上 SBS 效应的滤波器[55]

3.4　硅基单片集成滤波器

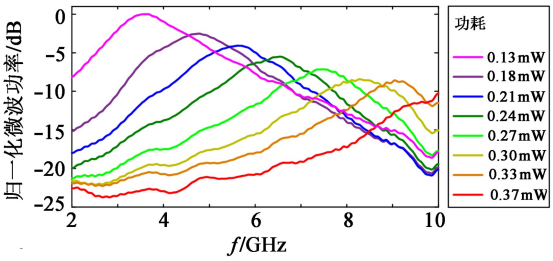
以上介绍的硅基相干型微波光子滤波器，仅无源的光滤波器部分实现了片上集成，系统中的激光器、调制器和探测器部分仍采用的是分立器件，因而系统复杂度仍然较高。硅基集成工艺的飞速发展，为实现单片集成硅基微波光子滤波器创造了可能。2018 年，加拿大多伦多大学的 Yao 课题组报道了世界上第一个硅基单片集成的微波光子滤波器[56]，器件结构如图 10(a)所示，包括一个相位调制器、一个热调谐微盘和一个探测器。基于 PM-IM 转换效应，实现了带通型滤波响应，并可通过热光效应调谐微盘谐振峰位置进而改变滤波通带的中心频率。测试结果如图 10（b）所示，3 dB 滤波带宽约为 1.93 GHz，滤波中心频率在 3～10 GHz 连续可调。这项研究工作初步证明了硅基单片集成微波光子滤波器的可行性，是推动硅基微波光子滤波器向更高集成度和实用化发展的重要一步。

然而该滤波器的性能指标，如滤波带宽和频率调谐范围均较差，与传统电滤波器相比优势并不明显。此外，该滤波器仅能固定实现带通滤波的功能。为解决这些问题，我们课题组提出了图 10(c)所示的硅基单片集成的高性能、滤波响应可切换的滤波器。将一个双驱动 MZ 调制器、一个高 Q 值微环和一个探测器全部集成在单个硅芯片上，光源通过光栅耦合器外部输入。通过调节 MZ 调制器的直流偏置点，可分别实现对射频输入的不等幅双边带调制和等效相位调制，进而分别得到带通型滤波和带阻型滤波效果，如图 10(d)所示。相比 Yao 课题组的工作，我们通过优化系统中调制器和探测器的工作

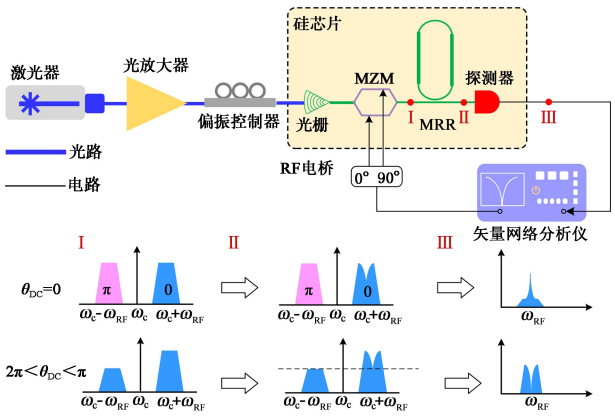
带宽，同时提升光滤波器的 Q 值，从而大幅度地提升了滤波器的滤波性能：带阻/带通滤波的中心频率调谐范围为 3～25 GHz/3～20 GHz，滤波带宽为 380～450 MHz/390～470 MHz。



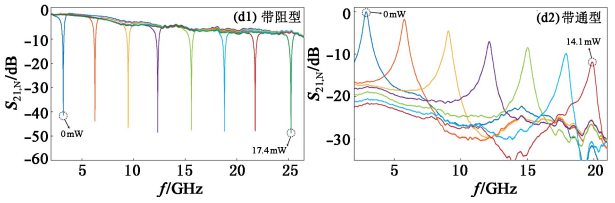
（a） 硅基带通滤波器的结构[56]



（b） 带通滤波测试结果[56]



（c） 硅基可切换型滤波器的系统构成与原理



（d） 可切换型滤波器的滤波测试结果

图 10 单片集成的硅基微波光子滤波器

4 总结与展望

表 1 列出了本文中所提及的具有代表性的硅基微波光子滤波器的研究结果，并对滤波性能进行了比较。可以看出，非相干型集成滤波器的相关研究较少，系统集成度不高，目前仅实现了单个器件的片上化，且性能与传统分立系统相比仍存在较大差距。因此，该类型的集成滤波器在未来仍有很大的研究潜力和价值，重点需要在实现高效率多波长光源、多通道高精度波形整形器和低损耗高色散波导等极具挑战性的研究方向进行探索与突破。

表 1 硅基微波光子滤波器的结构与性能比较

滤波器类型	片上集成的器件	滤波功能	滤波带宽/GHz	频率范围/GHz	抑制比/dB
非相干[15]	硅基 ODL	任意可重构	—	—	＞30
非相干[19]	氮化硅 MRR（克尔光频梳）	任意可重构	10	0～18	50
相干[31]	氮化硅 MRR	带阻	0.25～0.84	2～8	＞60
相干[32]	硅基 MRR	带通	0.17	2～18.4	26.5
相干[36]	硅基 MRR	带阻	0.78	0～40	＞60
相干[49]	硅基 MRR	带通/带阻	7/8.4	9.6～20.5	30/15
相干[51]	硅基 WBG	带阻	1	0～20	20
相干[55]	硅基悬浮波导（SBS 效应）	带阻	0.098	14～20	48
相干[42]	硅基 MRR＋探测器	带通	5.3～19.5	—	30
相干[56]	硅基 MRR＋调制器＋探测器	带通	1.93	3～10	15

相干型滤波器由于系统结构相对更简单，已在滤波带宽、调谐范围、带外抑制比等关键滤波指标上实现了较高的性能，达到了与分立系统或传统电滤波器相近的水平。同时，在硅基平台上实现相干型滤波器的单片集成也得到了初步验证。然而，硅基微波光子滤波器要实现真正的应用，目前仍面临诸多难题：系统中的光源均未实现集成；滤波器系统链路的光损耗较高，导致对输入微波信号的电学插损高；大部分研究仅在个别指标上实现了高性能，例如，基于硅 SBS 效应的滤波器实现了最窄的滤波带宽，然而在调谐范围和系统功耗方面则表现较差，尚未有多项性能兼顾的集成滤波器报道。

为进一步提升硅基微波光子滤波器的性能指标与集成度，满足在实际微波系统中的应用需求，未来主要需要在以下几个主要方向上努力：(1)面向微波光子滤波器的系统需求，实现更高性能的核心功能器件，包括高功率可集成硅基光源、高线性度低驱动电光调制器、低损耗高 Q 值无源光滤波器及高功率光电探测器；(2)基于硅基光电混合集成的工艺，实现光芯片与线性电放大器、跨阻放大器等电芯片的集成，提升滤波器系统的增益、噪声系数等指标；(3)形成完善成熟的硅基微波光子滤波器的封装工艺，解决管壳封装、射频封装、芯片温度反馈控制等重要工程问题。

参考文献：

[1] Yao J. Photonics to the rescue: A fresh look at microwave photonic filters[J]. IEEE Microwave Magazine, 2015, 16(8): 46-60.

[2] Capmany J, Mora J, Gasulla I, et al. Microwave photonic signal processing[J]. J. of Lightwave Technol., 2012, 31(4): 571-586.

[3] 黄宁博，孙亨利，张安旭，等. 微波光子滤波器在卫星通信信号处理中的应用[J]. 无线电工程，2016，46(9)：1-5.
Huang Ningbo, Sun Hengli, Zhang Anxu, et al. Application of microwave photonic filters in signal processing of satellite communications[J]. Radio Engin., 2016, 46(9):1-5.

[4] Rasras M S, Tu K Y, Gill D M, et al. Demonstration of a tunable microwave-photonic notch filter using low-loss silicon ring resonators[J]. J. of Lightwave Technol., 2009, 27(12): 2105-2110.

[5] Norberg E J, Guzzon R S, Nicholes S C, et al. Programmable photonic lattice filters in InGaAsP-InP[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2009, 22(2): 109-111.

[6] Norberg E J, Guzzon R S, Parker J S, et al. Programmable photonic microwave filters monolithically integrated in InP-InGaAsP[J]. J. of Lightwave Technol., 2011, 29(11): 1611-1619.

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

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

[9] Wang X, Liu J. Emerging technologies in Si active photonics [J]. J. of Semiconductors, 2018, 39(6): 061001.

[10] Zhang W, Yao J. Silicon-based integrated microwave photonics [J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2015, 52(1): 1-12.

[11] Liu Y, Choudhary A, Marpaung D, et al. Integrated microwave photonic filters[J]. Advances in Opt. and Photon., 2020, 12(2): 485-555.

[12] Oppenheim A V, Buck J R, Schafer R W. Discrete-Time Signal Processing[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.

[13] Capmany J, Ortega B, Pastor D, et al. Discrete-time optical processing of microwave signals[J]. J. of Lightwave Technol., 2005, 23(2): 702-723.

[14] Zhang W, Yu G. Tap multiplexed fibre grating-based optical transversal filter[J]. Electron. Lett., 2000, 36(20): 1708-1710.

[15] Burla M, Marpaung D, Zhuang L, et al. On-chip CMOS compatible reconfigurable optical delay line with separate carrier tuning for microwave photonic signal processing[J]. Opt. Express, 2011, 19(22): 21475-21484.

[16] Morichetti F, Melloni A, Martinelli M, et al. Box-shaped dielectric waveguides: A new concept in integrated optics? [J]. J. of Lightwave Technol., 2007, 25(9): 2579-2589.

[17] Wang J, Ashrafi R, Adams R, et al. Subwavelength grating enabled on-chip ultra-compact optical true time delay line[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 30235.

[18] Liao S, Ding Y, Dong J, et al. Arbitrary waveform generator and differentiator employing an integrated optical pulse shaper[J]. Opt. Express, 2015, 23(9): 12161-12173.

[19] Xue X, Xuan Y, Kim H J, et al. Programmable single-bandpass photonic RF filter based on Kerr comb from a microring[J]. J. of Lightwave Technol., 2014, 32(20): 3557-3565.

[20] Shu H, Tao Y, Xie W, et al. Ultra-efficient RF photonics filter based on an AlGaAs-on-insulator integrated Kerr frequency comb source[C]// Proc. of CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2020: SF1O.2.

[21] Chang L, Xie W, Shu H, et al. Ultra-efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator microresonators[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-8.

[22] Metcalf A J, Kim H J, Leaird D E, et al. Integrated line-by-line optical pulse shaper for high-fidelity and rapidly reconfigurable RF-filtering[J]. Opt. Express, 2016, 24(21): 23925-2394.

[23] Zheng S, Long Y, Gao D, et al. Chip-scale reconfigurable optical full-field manipulation: enabling a compact grooming photonic signal processor[J]. ACS Photon., 2020, 7(5): 1235-1245.

[24] Sancho J, Bourderionnet J, Lloret J, et al. Integrable microwave filter based on a photonic crystal delay line[J]. Nature Commun., 2012, 3(1): 1-9.

[25] Chen G F R, Wang T, Donnelly C, et al. Second and third order dispersion generation using nonlinearly chirped silicon waveguide gratings[J]. Opt. Express, 2013, 21(24): 29223-29230.

[26] Mia M B, Jaidye N. Extremely high dispersions in heterogeneously coupled waveguides[J]. Opt. Express, 2019, 27(8): 10426-10437.

[27] Palaci J, Villanueva G E, Galan J V, et al. Single bandpass photonic microwave filter based on a notch ring resonator[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2010, 22(17): 1276-1278.

[28] Li W, Li M, Yao J. A narrow-passband and frequency-tunable microwave photonic filter based on phase-modulation to intensity-modulation conversion using a phase-shifted fiber Bragg grating[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(5): 1287-1296.

[29] Liu Li, Yang Ting, Dong Jianji. Microwave photonic filter with a continuously tunable central frequency using an SOI high-*Q* microdisk resonator[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(9): 093201.

[30] Liu L, Jiang F, Yan S, et al. Photonic measurement of microwave frequency using a silicon microdisk resonator[J]. Opt. Commun., 2015, 335: 266-270.

[31] Marpaung D, Morrison B, Pant R, et al. Si_3N_4 ring resonator-based microwave photonic notch filter with an ultrahigh peak rejection[J]. Opt. Express, 2013, 21(20): 23286-23294.

[32] Qiu H, Zhou F, Qie J, et al. A continuously tunable sub-gigahertz microwave photonic bandpass filter based on an ultra-high-*Q* silicon microring resonator[J]. J. of Lightwave Technol., 2018, 36(19): 4312-4318.

[33] Zhang Y, Hu X, Chen D, et al. Design and demonstration of ultra-high-*Q* silicon microring resonator based on a multi-mode ridge waveguide[J]. Opt. Lett., 2018, 43(7): 1586-1589.

[34] Zhang L, Jie L, Zhang M, et al. Ultrahigh-*Q* silicon racetrack resonators[J]. Photon. Research, 2020, 8(5): 684-689.

[35] 李元栋，王 荣，蒲 涛，等. 高带外抑制比微波光子滤波器研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2018，55(2)：50-57.
Li Yuandong, Wang Rong, Pu Tao, et al. Review on high out-of-band suppression ratio of microwave photonic filter[J]. Laser & Optoelectron. Progress, 2018, 55(2): 50-57.

[36] Liu X, Yu Y, Tang H, et al. Silicon-on-insulator-based microwave photonic filter with narrowband and ultrahigh peak rejection[J]. Opt. Lett., 2018, 43(6): 1359-1362.

[37] Liu Y, Marpaung D, Choudhary A, et al. Lossless and high-resolution RF photonic notch filter[J]. Opt. Lett., 2016, 41(22): 5306-5309.

[38] Marpaung D, Morrison B, Pagani M, et al. Ultra-high suppression microwave photonic bandstop filters[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(22): 2684-2692.

[39] Liu Y, Hotten J, Choudhary A, et al. All-optimized integrated RF photonic notch filter[J]. Opt. Lett., 2017, 42(22): 4631-4634.

[40] Liu Y, Marpaung D, Choudhary A, et al. Link performance optimization of chip-based Si_3N_4 microwave photonic filters [J]. J. of Lightwave Technol., 2018, 36(19): 4361-4370.

[41] Taddei C, Zhuang L, Roeloffzen C G H, et al. High-selectivity on-chip optical bandpass filter with sub-100-MHz flat-top and under-2 shape factor[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2019, 31(6): 455-458.

[42] Xu L, Hou J, Tang H, et al. Silicon-on-insulator-based microwave photonic filter with widely adjustable bandwidth [J]. Photon. Research, 2019, 7(2): 110-115.

[43] Dong P, Feng N N, Feng D, et al. GHz-bandwidth optical filters based on high-order silicon ring resonators[J]. Opt. Express, 2010, 18(23): 23784-23789.

[44] Madsen C K, Zhao J H. Optical Filter Design and Analysis [M]. New York: Wiley, 1999.

[45] Zhuang L, Roeloffzen C G H, Hoekman M, et al. Programmable photonic signal processor chip for radio frequency applications[J]. Optica, 2015, 2(10): 854-859.

[46] Perez D, Gasulla I, Crudgington L, et al. Multipurpose silicon photonics signal processor core[J]. Nature Commun., 2017, 8(1): 1-9.

[47] Zhang W, Yao J. Photonic integrated field-programmable disk array signal processor[J]. Nature Commun., 2020, 11(1): 1-9.

[48] Xie Y, Geng Z, Zhuang L, et al. Programmable optical processor chips: toward photonic RF filters with DSP-level flexibility and MHz-band selectivity[J]. Nanophotonics, 2017, 7(2): 421-454.

[49] Li S, Cong R, He Z, et al. Switchable microwave photonic filter using a phase modulator and a silicon-on-insulator micro-ring resonator[J]. Chinese Opt. Lett., 2020, 18(5): 052501.

[50] Yang H, Li J, Zheng P, et al. A stopband and passband switchable microwave photonic filter based on integrated dual ring coupled Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Photonics J., 2019, 11(4): 1-8.

[51] Burla M, Bazargani H P, St-Yves J, et al. Widely tunable microwave photonics notch filter based on a waveguide Bragg grating on silicon[C]// Proc. of 2014 IEEE Photonics Conf., 2014: 208-209.

[52] Burla M, Bazargani H P, St-Yves J, et al. Frequency agile microwave photonics notch filter based on a waveguide Bragg grating on silicon[C]// Proc. of Microwave Photonics (MWP) and the 2014 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conf. (APMP), 2014: 392-394.

[53] Zhang W, Yao J. A fully reconfigurable waveguide Bragg grating for programmable photonic signal processing[J]. Nature Commun., 2018, 9(1): 1-9.

[54] Marpaung D, Morrison B, Pagani M, et al. Low-power, chip-based stimulated Brillouin scattering microwave photonic filter with ultrahigh selectivity[J]. Optica, 2015, 2(2): 76-83.

[55] Casas-Bedoya A, Morrison B, Pagani M, et al. Tunable narrowband microwave photonic filter created by stimulated Brillouin scattering from a silicon nanowire[J]. Opt. Lett., 2015, 40(17): 4154-4157.

[56] Zhang W, Yao J. On-chip silicon photonic integrated frequency-tunable bandpass microwave photonic filter[J]. Opt. Lett., 2018, 43(15): 3622-3625.

作者简介：

陶源盛(1995—)，男，河南人，2017年本科毕业于电子科技大学，现为博士研究生，主要研究方向为硅基微波光子学；

王兴军(1976—)，男，辽宁人，博士，教授，博士生导师，教育部首批青年长江学者，教育部新世纪优秀人才，主要研究方向为光电子集成技术；

胡薇薇(1963-)女，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为光学相控阵、毫米波光纤通信系统与可见光通信。