光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260514002

基于微环谐振干涉增强的可重构精细光子滤波技术

盛顺锋，陈　颖，瞿鹏飞，庾财斌，汤振华，龚　巧，肖永川*

（中电科芯片技术（集团）有限公司，重庆 401332）

摘　要： 针对超宽带跨频段微波光子系统对精细化可重构光子滤波的应用需求，文章提出一种基于三环辅助马赫-曾德尔干涉仪（3MRR-MZI）的片上滤波架构。通过非平衡三谐振环增强滤波器的频率选择性以及调谐重构能力，建立了光子滤波器的数学模型，分析了滤波器可实现的关键性能参数。并基于薄膜铌酸锂材料制作了光子滤波芯片，通过测试实现了中心频率调谐范围为0.66～46.56 GHz、带宽重构范围为4.85～10.73 GHz、芯片光插损2.88 dB、矩形系数小于3等指标，与设计结果一致。

关键词： 微波光子技术；精细光子滤波器；可重构滤波器；微环谐振器；薄膜铌酸锂

中图分类号： TN713　**文章编号：** 1001－5868(2026)05－0871－07

Reconfigurable Fine Photonic Filtering Technology Based on Micro-Ring Resonant Interference Enhancement

SHENG Shunfeng, CHEN Yin, QU Pengfei, YU Caibin, TANG Zhenhua, GONG Qiao, XIAO Yongchuan

(**CETC Chips Technology (Group) Co., Ltd., Chongqing 401332, CHN**)

Abstract: To meet the requirements for fine-tunable and reconfigurable photonic filtering in ultra-wideband crossband microwave photonic systems, this paper proposes an on-chip filtering architecture based on a three-ring-assisted Mach-Zehnder interferometer. By employing an unbalanced triple-resonator ring to enhance the frequency selectivity and tuning reconfiguration capability of the filter, a mathematical model of the photonic filter is developed, and its key performance parameters are analyzed. A photonic filter chip was fabricated using thin-film lithium niobate material. Testing demonstrated a center-frequency tuning range of 0.66～46.56 GHz, a bandwidth reconfiguration range of 4.85～10.73 GHz, an on-chip optical insertion loss of 2.88 dB, and a rectangularity factor below 3. These results are consistent with the theoretical design results.

Key words: microwave photonic technology; microring resonator; fine photonic filter; reconfigurable filter; thin-film lithium niobate

0　引言

微波光子滤波器相较于传统微波滤波器在大带宽、抗干扰、高效调谐性等方面具有明显优势，可以替代传统射频微波滤波器在射频收发前端光域上实现微波信号的频率选择、噪声抑制、信道分离与干扰滤除，以降低后续混频、解调模块的噪声，提升接收灵敏度与无杂散动态范围[1-5]。在现代宽带、动态、多频段微波信号处理系统中，微波光子滤波器的可调谐与可重构性是系统适应复杂电磁环境、多任务协同、抗干扰的关键。凭借光域调控的高灵敏度优势，其可重构与可调谐性能显著提升微

收稿日期：2026－06－26.

基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFF0728000）.

* **通信作者：**肖永川

波信号处理能力。因此，实现中心频率大范围调谐、带宽灵活重构、兼具小矩形系数与高带外抑制度的光学滤波器，已成为推动射频前端性能突破的关键[6]。

微波光子滤波器按光域信号处理方式分为非相干型与相干型：前者基于光强线性叠加，仅做功率加权与时间延迟，如多抽头光纤延时线和光纤光栅阵列，其结构简单、环境稳定性好，但滤波函数类型有限、抽头数受限，难以实现任意幅相重构和高阶陡降。近年来，非相干型微波光子滤波器在中心频率调谐范围（0.5～40 GHz）、环境稳定性方面取得显著进展，但带宽重构不够灵活（小于10 GHz），其Q值较低（小于500），且在芯片上的集成度不足，难以实现系统单片集成，更适合宽带稳定预处理、多频段兼容、低成本抗干扰场景[7-10]。而相干型滤波器通过调控各支路的光程差、相位差、偏振态，在光域实现电场矢量叠加，从而构造任意幅频、相频滤波响应。该滤波器主要包括微环谐振器、布拉格光栅构成的FP干涉仪以及MZI干涉仪等典型方案及其组合方案。布拉格光栅周期固定且调谐性差，而MZI的Q值较低且矩形系数差。微环谐振器具有Q值大（1×10^4～1×10^6）、中心频率调谐范围宽（1～48 GHz）、带外抑制度高（30～50 dB）、矩形系数小（2～5）的优点，易于片上集成。这些优点使基于微环谐振器的微波光子滤波器在面对宽带、动态的信号时具有更强的适应能力，但需要进行主动温度与相位控制，降低其环境敏感性[8-16]。

在微环谐振器光滤波器方面，研究人员致力于提升其调谐灵活性与带宽重构能力。通过级联或串联的方式增加微环的数量以提高滤波器的阶数，实现高阶、陡峭的滤波性能。此外，还基于马赫-曾德尔干涉仪（MZI）和微环谐振器（MRR）的组合方案实现更复杂的幅相响应[17]。相比于分立器件面临的体积庞大、功耗高及环境稳定性差等问题，基于硅基平台的微环结构已成为微波光子滤波器研究的热点，并取得一定的成绩。近年来，薄膜铌酸锂调制器广泛应用于微波光子电光转换。薄膜铌酸锂平台兼具宽透明窗口、低光学损耗（0.2 dB/cm）及较高的热调谐效率的优势，是开展低损耗、可调谐、可重构滤波器的良好平台，同时有助于实现滤波器与调制器单片集成[18-19]。因此，本文针对单一滤波架构重构性与调谐性受限、矩形系数过大等问题，基于薄膜铌酸锂平台设计、仿真并验证了一种基于三环辅助MZI结构的集成微波光子滤波器。

1 可重构精细光子滤波器架构

对于微环型光子滤波器而言，具有高精细度滤波特性的高阶滤波器需要通过增加微环数量来实现。然而高阶高精细度光子滤波器具有器件插损大、调谐参量复杂、功耗高及控制难度大等缺点。因此，在微环谐振型光子滤波器的架构设计中，需要衡量精细度和插损等因素，以确定微环数量。本文所设计的基于MZI＋MRR组合架构的带通光子滤波器，本质上是FIR与IIR滤波器的组合，借鉴了电域中数字滤波器的设计方法来确定光子滤波器的阶数与架构。选取典型的椭圆滤波器作为原型滤波器，基于Matlab的滤波器设计工具箱确定满足设计要求的滤波器最小阶数为3，将模拟滤波器传递函数转换为数字滤波器传递函数，最后再根据传递函数完成光子滤波器的结构映射。本文设计了一种非平衡三谐振环的光子滤波器，通过非平衡三环辅助马赫-曾德尔干涉仪（3MRR-MZI）滤波架构实现滤波器边沿的精细处理，在保证光子滤波器精细度的同时，有效降低了微环数量。非平衡3MRR-MZI滤波器架构示意图如图1所示。

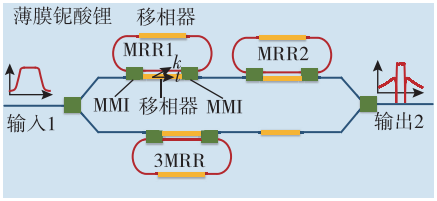


图1 非平衡3MRR-MZI滤波器架构示意图

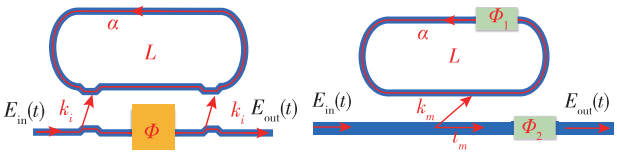
整个微环滤波芯片基于低损耗薄膜铌酸锂平台实现。由于MZI的上下两臂不平衡设计，需要在MZI下臂加入一个热移相器用于平衡MZI合路处两臂的相位，保证输出两臂具有相同的相位。考虑到光子滤波器的调谐性和重构性功能，在微环上设计了可调热移相器实现微环中心谐振频率调谐，在微环与直波导的耦合区采用可调MZI结构实现耦合系数的调谐与带宽重构功能。

2 3MRR-MZI滤波器数学模型

2.1 耦合系数可调微环谐振器特性

3MRR-MZI滤波器由三个耦合系数可调的直通型微环谐振器组合构成，每个微环的物理结构

完全一致。因此，需要对单个耦合系数可调微环谐振器进行数学分析。如图 2(a)所示，微环谐振器的耦合区为两臂不平衡的 MZI，通过热光调节一臂的相位实现等效耦合系数的调谐。如图 2(b)所示，等效后的模型为直通型微环谐振器，其交叉耦合系数为可调 MZI 的等效耦合系数 k_m，等效后的模型会在微环上产生附加相位 Φ_1，在输出端产生附加相位 Φ_2。



(a) 耦合系数可调微环模型　　(b) 等效模型

图 2　直通型微环数学模型

由此得到耦合系数可调的直通型微环传递函数为：

$$T=\frac{\sqrt{1-k_m^{\,2}}-\exp(-j\alpha L)\exp(-j\phi_{\mathrm{ring}})}{1-\sqrt{1-k_m^{\,2}}\exp(-j\alpha L)\exp(-j\phi_{\mathrm{ring}})}\times \exp(-j\phi_2) \tag{1}$$

式中，k_i 为可调耦合区 MZI 两端的 MMI 分光比，k_m 为等效交叉耦合系数，t_m 为等效透射耦合系数，ϕ_1 为等效的环上附加相位，ϕ_2 为输出端等效附加相位，ϕ_{ring} 为绕环一周的总相位，分别表达为：

$$\begin{aligned} k_m&=\sqrt{1-4k_i(1-k_i)\cos^2(\phi/2)}\\ t_m&=\sqrt{1-k_m^{\,2}}\\ \phi_1&=\frac{\phi}{2}-\arctan\left[\frac{\tan(\phi/2)}{1-2k_i}\right]\\ \phi_2&=\frac{\phi}{2}+\arctan\left[\frac{\tan(\phi/2)}{1-2k_i}\right]\\ \phi_{\mathrm{ring}}&=\phi_1+\beta L \end{aligned} \tag{2}$$

当工艺误差导致 MZI 上的 MMI 分光比非严格 1∶1 时，调节热移相器的 ϕ 值，等效耦合系数 k_m 将不满足(0,1)的调节范围。对图 3 分析得到：当 MMI 分光比误差为 10% 时，k_m 调谐范围为(0,0.98)。而环上的等效附加相位 ϕ_1 可通过调节微环上的热移相器来消除，输出端等效附加相位 ϕ_2 可以通过调节 MZI 下臂的热移相器进行两臂相位之间的平衡，将不会影响滤波器整体的传输响应。因此，耦合系数可调的微环结构带来了带宽的可重构性，但牺牲了部分耦合系数的调谐范围。

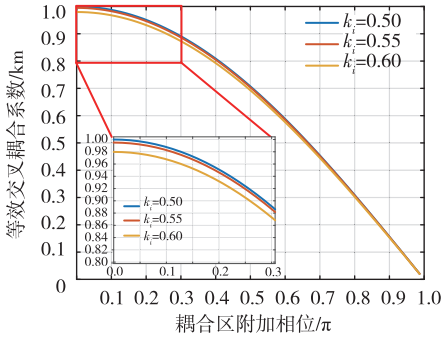


图 3　MMI 分光比对等效耦合系数 km 的影响

2.2　3MRR-MZI 滤波器传递函数

为了分析 3MRR-MZI 滤波器的光谱响应及重构与调谐原理，需要对其进行传递函数求解。首先给出单个直通型微环谐振器的强度传递函数：

$$T=\frac{\sqrt{1-k^2}-\exp(-j\alpha L)\exp(-j\beta L)}{1-\sqrt{1-k^2}\exp(-j\alpha L)\exp(-j\beta L)} \tag{3}$$

式中，k 为耦合区的交叉耦合系数；α 为损耗因子，表示为微环一周的强度传输损耗；$\beta=2\pi/\lambda$ 为波矢；L 为微环的腔长。

采用传输矩阵法对图 4 所示的非平衡 3MRR-MZI 滤波器进行建模分析。

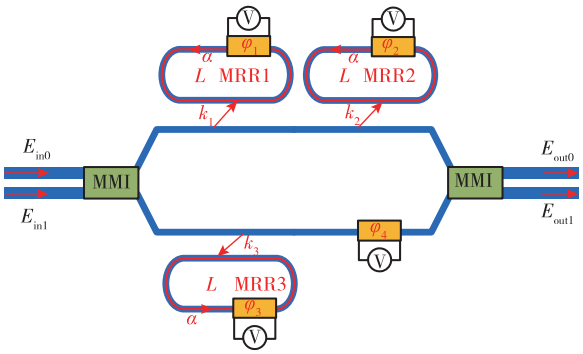


图 4　非平衡 3MRR-MZI 滤波器数学模型

根据光传输方向，光依次经过的器件为 2×2 MMI、MZI 的上下两臂、2×2 MMI，滤波器输出光场表示为：

$$\begin{bmatrix}E_{out0}(t)\\E_{out1}(t)\end{bmatrix}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}1&-j\\-j&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}T_1&0\\0&T_2\exp(-j\varphi_4)\end{bmatrix}\times \begin{bmatrix}1&-j\\-j&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}E_{in0}(t)\\E_{in1}(t)\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中，T_1 为 MZI 上臂的级联微环的传递函数，T_2 为 MZI 下臂单个微环的传递函数。

$$T_1=\frac{\sqrt{1-k_1^{\ 2}}-\exp(-j\alpha L_1)\exp(-j\beta L_1)}{1-\sqrt{1-k_1^{\ 2}}\exp(-j\alpha L_1)\exp(-j\beta L_1)}\times$$
$$\frac{\sqrt{1-k_2^{\ 2}}-\exp(-j\alpha L_2)\exp(-j\beta L_2)}{1-\sqrt{1-k_2^{\ 2}}\exp(-j\alpha L_2)\exp(-j\beta L_2)} \quad (5)$$
$$T_2=\frac{\sqrt{1-k_3^{\ 2}}-\exp(-j\alpha L_3)\exp(-j\beta L_3)}{1-\sqrt{1-k_3^{\ 2}}\exp(-j\alpha L_3)\exp(-j\beta L_3)}$$

假设光只从一端输入即$E_{in1}=0$,那么滤波器直通端的传递函数为:

$$T=\frac{E_{in0}(t)}{2}\cdot\left[T_1-T_2\exp(-j\varphi_4)\right] \quad (6)$$

由式(6)可知,输出端的光强为MZI上下两臂传递函数的差值,通过MZI结构辅助可以构造出上下两臂微环的干涉增强型传递函数。

3 3MRR-MZI调谐与重构特性仿真

3.1 仿真参数设计

按照重构性和调谐性的设计目标,3个微环的环长均为2.94 mm,此时高精细滤波器中心频率的调谐范围约50 GHz,保证较大的中心频率调谐范围。在本文采用的薄膜铌酸锂工艺水平下,波导传输损耗低至0.2 dB/cm,微环谐振器的Q值高达2×10^6,薄膜铌酸锂热移相器的半波功率仅40 mW,实现了高效热光调谐。下面将基于表1所示的薄膜铌酸锂实际工艺水平开展滤波器的建模与仿真。

表1 薄膜铌酸锂工艺水平

功能单元对象	功能单元指标
微环周长	2 940.5 μm
波导传输损耗	0.2 dB/cm
MMI/DC插损	0.2 dB
移相器PS插损	0.1 dB
1/4弧弯曲损耗	0.02 dB
损耗因子	0.963 9

单个微环在不同耦合系数t下的透射光谱如图5所示,透射耦合系数t和α相差越远,消光比越小,微环光谱带宽越大。因此,使MRR1及MRR2的透射耦合系数t接近α,有利于降低滤波器的最小带宽,实现精细滤波。

经过多轮参数优化,在表2给出的耦合系数组合下可以实现窄带、高矩形系数的带通滤波,同时可以保证较低的器件光插损。

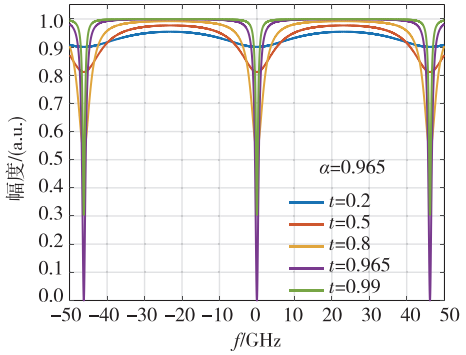


图5 单个微环在不同耦合系数t下的透射光谱

表2 优化后的滤波器耦合系数

优化参数	MRR1	MRR2	MRR3
交叉耦合系数k	0.530	0.530	0.850
透射耦合系数t	0.848	0.848	0.527

3.2 调谐与重构仿真

根据表2优化后的三组耦合系数,在调谐与重构过程中耦合系数保持不变,接下来对基于3MRR-MZI滤波器的传递函数对中心频率调谐与带宽重构原理进行分析。式(6)表明滤波器的透射传递函数T为上臂的级联微环传递函数T_1和下臂的单环传递函数T_2的差值,图6展示了MZI上下两臂的传递函数,在T_1与T_2的交点处,滤波器具有极小值的响应,而在中心谐振频率处滤波器具有极大值的响应。由于MZI结构的辅助,实现了MZI上下两臂非平衡MRR传递函数的滤波边沿精细处理。

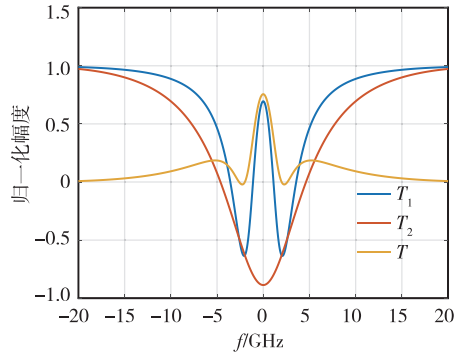
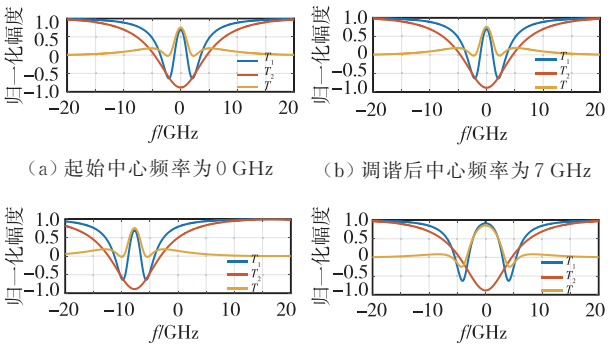


图6 滤波器MZI上下两臂传递函数分解

中心频率调谐与带宽重构原理见图7。在带宽重构与中心频率调谐过程中,MRR1与MRR2的中心谐振频率关于MRR3的中心谐振频率左右对称分布,即$f_{MRR1}-f_{MRR3}=f_{MRR3}-f_{MRR2}=\Delta f$,以确保滤波函数左右对称。调谐MRR1与MRR2环上的热移相器使其远离MRR3的谐振频率,即增大Δf,透射光谱T_1的谐振峰带宽增加,对应光子滤波器谐振峰带宽也随之增加,以实现滤波器的宽带重构;反之,

减小 Δf 可实现滤波器的窄带重构。在同一 Δf 下，保持滤波器的带宽不变，同时增加或减小 MRR1、MRR2 与 MRR3 的中心谐振频率 f_{MRR}，则滤波器传递函数的同步频率搬移，实现中心频率 f_{MRR} 的调谐。

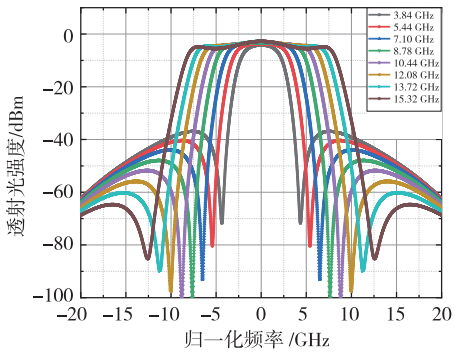


（a）起始中心频率为 0 GHz　（b）调谐后中心频率为 7 GHz

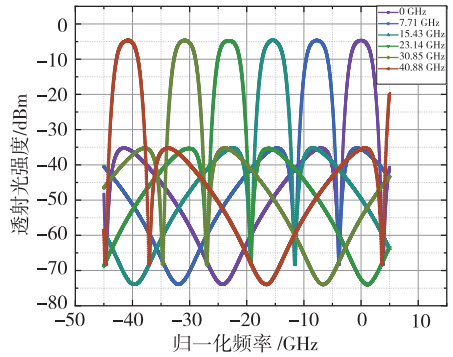
（c）起始带宽为 3 GHz　（d）重构后带宽为 6 GHz

图 7　中心频率调谐与带宽重构原理

图 8(a)展示了 3MRR-MZI 滤波器在不同带宽下具有不同的光谱形状，带宽越大，光谱的消光比越大，带外抑制度越高，器件插损越小，矩形系数越小。受限于滤波器的自由光谱范围，图 8(b)仿真得到的中心频率调谐范围为直流至 40 GHz。



（a）3.8～15.3 GHz 带宽重构能力仿真



（b）直流至 40 GHz 中心频率调谐范围仿真

图 8　中心频率调谐与带宽重构能力仿真

表 3 计算了不同带宽重构状态下的滤波器核心指标，结果表明该滤波器消光比大于 60 dB、带外抑制度大于 30 dB，且矩形系数小于 1.9，芯片插损小于 4.2 dB。具有陡峭的滤波下降沿，可以实现低损耗的高精细度光子滤波。

表 3　不同带宽下重构状态下光子滤波器指标

3 dB 带宽/GHz	带外抑制度/dB	消光比/dB	矩形系数/(20 dB/3 dB)	芯片插损/dB
3.84	32.67	67.4	1.86	4.24
5.44	36.73	76.66	1.65	3.67
7.1	40.71	89.7	1.52	3.33
8.78	44.71	115.66	1.44	3.12
10.44	48.79	112	1.39	2.99
12.08	53.01	94.71	1.35	2.89
13.72	57.4	86.99	1.33	2.83
15.32	61.89	82.44	1.31	2.78

4　样品制作与测试分析

3MRR-MZI 光子滤波器芯片尺寸为 6 mm×3.3 mm，考虑热移相器之间的热串扰，在芯片版图上相邻电阻之间的间距大于 1 000 μm，同时设计了深度约 20 μm 的隔热槽以降低热串扰。图 9 展示了光子滤波器光引擎的实物图，为了排除温度大范围扰动的影响，在器件封装时采用了高精度 TEC 模组，温度控制精度 0.01℃，左侧使用保偏光纤阵列进行输入输出光耦合，下侧通过金丝与 COB 板进行电气连接。

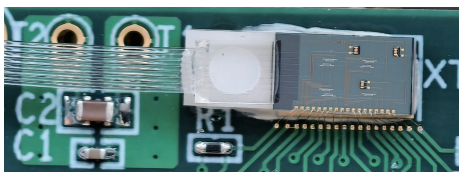


图 9　3MRR-MZI 滤波器实物图

图 10 展示了管壳封装后的精细光子滤波器实物照片，器件尺寸仅与一枚硬币相当。

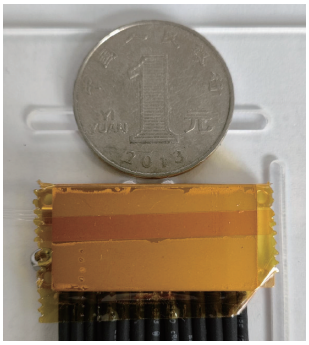


图 10　管壳封装后的光子滤波器实物图

对 3MRR-MZI 光子滤波器分别进行了带宽可重构性、中心频率可调谐性以及器件插损相关测

试。采取图11所示的测试方案，使用宽谱光源与光谱分析仪实时采集滤波器光谱，分析其重构与调谐性；采用可调谐激光器与光功率测量器件的带内光插损。其中，光谱仪采用APEX的0.04 pm分辨率的光谱分析仪（型号：AP2081A）。

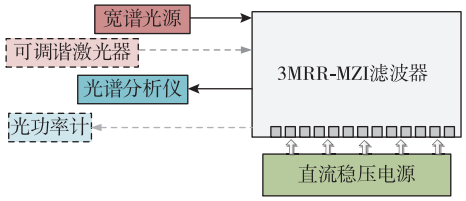


图11 光子滤波器光谱与插损测试系统示意图

图12为滤波器带宽重构范围的光谱测试结果，通过调谐微环的谐振波长和耦合系数，实现了滤波器4.85，7.74，10.73 GHz的3 dB带宽重构，三种状态在阻带区均保持良好的抑制特性，带外抑制度均优于19.38 dB，能够实现对杂散信号的有效抑制。三种带宽下的实测中心波长均稳定在1 549.99 nm附近，未出现明显偏移，表明重构机制未影响中心波长的稳定性。矩形系数定义为20 dB带宽与3 dB带宽的比值。随着带宽的增加，矩形系数得到优化，分别为5.15，2.94，2.33。这是由于重构带宽是通过移动上臂两个微环的中心频率间隔来实现的，并不改变单个微环传递函数的滚降系数。随着3 dB带宽的减小，矩形系数增大，实验结果与仿真规律一致。

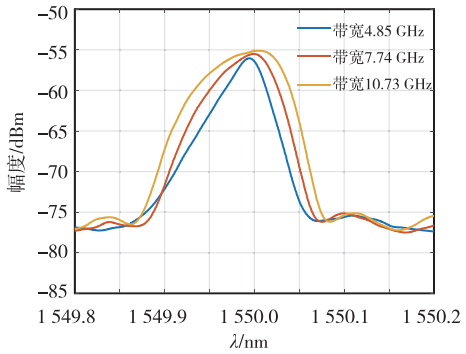
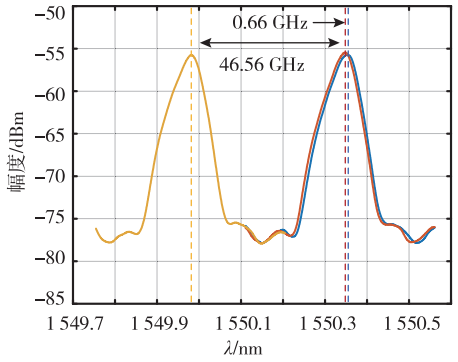
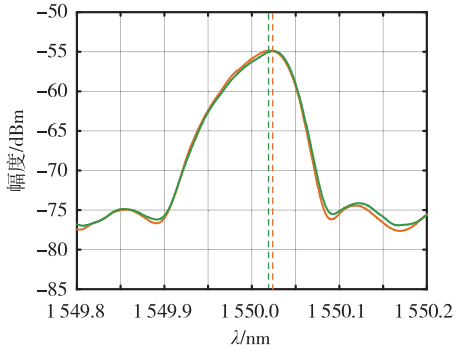


图12 带宽重构光谱测试结果

图13为滤波器中心频率调谐范围及调谐步进的光谱测试结果，通过调谐微环的谐振频率，滤波器的中心频率实现了0.66～46.56 GHz的离散调节，调谐步进可以低至344.39 MHz。各调谐状态下带宽均保持在10 GHz左右，表明调谐与重构功能之间具有良好的独立性。值得注意的是，实测滤波器透射光谱的消光比仅20 dB左右，这是由于在薄膜铌酸锂工艺能力下MMI存在±5%的分光误差，使得非平衡MZI干涉仪的消光比约为20 dB，从而劣化了整个滤波器件的消光比。此外，由于滤波器MZI上下两臂的微环数量不一致，存在臂长差，改变了器件的干涉条件，从而直接影响滤波器的通带形状和消光比。



（a）调谐范围测试结果



（b）调谐步进测试结果

图13 中心频率调谐实测结果

在宽带条件下测得滤波器的光插损为6.70 dB，通过U-loop测试得到阵列光纤端面耦合损耗为4.24 dB，最终计算得到片上光插损仅2.46 dB。窄带条件下器件光插损为7.12 dB，片上光插损仅2.88 dB，与仿真规律一致。测试结果证明，非平衡3MRR-MZI架构的滤波器具有极低的插损。

5 总结

本文提出了一种基于干涉增强原理的非平衡3MRR-MZI可重构滤波技术，通过建立滤波器数学模型以及精确的参数设计，实现了滤波器的重构性与调谐性仿真。制作的滤波器实物测试结果表明，光子滤波器实现了4.85～10.73 GHz的带宽重构且中心频率调谐范围优于0.66～46.56 GHz，滤波器

通带内的芯片插损仅 2.88 dB，在宽带情况下矩形系数低于 3。该光子滤波器具有大范围调谐、带宽重构灵活、低矩形系数的优势，提高了微波光子频域处理系统的精细度、灵活度，同时以小体积嵌入系统中提高了系统的集成度。

参考文献：

[1] 陶源盛，王兴军，胡薇薇．硅基微波光子滤波器的研究进展[J]．半导体光电，2021，42(1)：1-10.
Tao Yuansheng，Wang Xingjun，Hu Weiwei. Recent progresses of silicon integrated microwave photonic filters[J]. Semiconductor Optoelectronics，2021，42(1)：1-10.

[2] Zhou Y，Wang L，Liu Y，et al. Microwave photonic filters and applications[J]. Photonics，2023，10(10)：1110.

[3] 陈　诺，彭若雪，肖永川，等．基于光电融合的宽带低相噪信号产生方法[J]．半导体光电，2025，46(6)：1017-1024.
Chen Nuo，Peng Ruoxue，Xiao Yongchuan，et al. Broadband low phase noise signal generation method based on photoelectric fusion [J]. Semiconductor Optoelectronics，2025，46(6)：1017-1024.

[4] 刘　婷，汤振华，王茂旭，等．振动下微波光收发链路附加相位噪声研究[J]．半导体光电，2024，45(6)：986-989.
Liu Ting，Tang Zhenhua，Wang Maoxu，et al. Analysis of additional phase noise of microwave optical transceiver link under vibration perturbation[J]. Semiconductor Optoelectronics，2024，45(6)：986-989.

[5] Tao Z，Tao Y，Jin M，et al. Highly reconfigurable silicon integrated microwave photonic filter towards next-generation wireless communication [J]. Photonics Research，2023，11(5)：682.

[6] Chen W，Qiu L F，Wu L S. Reconfigurable filter with switchable operating frequency，bandwidth，and response type using RF switches and circulators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques，2025，73(3)：1708-1716.

[7] Li X P，Chen K X，Wang L F. Compact and electro-optic tunable interleaver in lithium niobate thin film [J]. Optics Letters，2018，43(15)：3610-3613.

[8] Cao S，Chen J，Damask J N，et al. Interleaver technology：comparisons and applications requirements [J]. Journal of Lightwave Technology，2004，22(1)：281-289.

[9] Yin Z，Yin F，Chen G，et al. High-resolution reconfigurable RF signal spectral processor [J]. Optics Express，2023，31(18)：29145-29155.

[10] Zhang W，Yuwen X，Wang B. Chip-based widely tunable and independently switchable multiple narrow bandpass microwave photonic filters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques，2025，73(8)：5351-5362.

[11] Wu X，Wang B，Zhang W. Electrically tunable microwave photonic filter using a phase-shifted waveguide Bragg grating on thin-film lithium niobate [C]//2025 13th International Conference on Intelligent Computing and Wireless Optical Communications (ICWOC)，2025：102-105.

[12] Deng J，Yao H，Sun Y，et al. Tunable narrow band-rejection and band-pass filter based on long-period waveguide grating on a thin-film lithium niobate rib waveguide [J]. Optics Express，2024，32(18)：32495-32503.

[13] Wang Z，Chen Z，Feng H，et al. Integrated lithium niobate Vernier micro-ring filter with wide and fast tuning capabilities[J]. Optics Express，2024，32(25)：44272.

[14] Yan H，Xie Y，Zhang L，et al. Wideband-tunable on-chip microwave photonic filter with ultrahigh- Q U-bend-Mach - Zehnder-interferometer-coupled microring resonators [J]. Laser & Photonics Reviews，2023，17(11)：2300347.

[15] 孙良辰，李金野，贾倩倩，等．基于微环的响应可切换微波光子滤波器[J]．激光与光电子学进展，2023，60(9)：285-292.
Sun Liangchen，Li Jinye，Jia Qianqian et Microring-Based Response-Switchable Microwave Photonic Filter[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2023，60(9)：285-292.

[16] Yang T，Zhang S，Zhang T，et al. On-chip optical spectrometer with a tunable micro-ring resonator and a Mach-Zehnder interferometer lattice filter [J]. Optics Express，2025，33(1)：639-649.

[17] 郑鹏飞，恽斌峰．可重构自耦合微环辅助的MZI集成光子滤波器[J]．光学 精密工程，2020，28(1)：1-9.
Zheng Pengfei，Yun Binfeng. Reconfigurable optical filter based on self-couple ring resonator assisted MZI structure[J]. Optics and Precision Engineering，2020，28(1)：1-9.

[18] 郑帅峰，刘佰畅，田自君，等．铌酸锂M-Z电光强度调制器光辐射模研究[J]．半导体光电，2024，45(1)：74-78.
Zheng Shuaifeng，Liu Baichang，Tian Zijun，et al. Study on the radiation-mode light of the lithium niobate electric-optical intensity modulator with M-Z optical waveguide [J]. Semiconductor Optoelectronics，2024，45(1)：74-78.

[19] 刘佳旭，周桥玲，周敬杰，等．基于慢波电极薄膜铌酸锂电光调制器的超短光脉冲产生[J]．半导体光电，2025，46(4)：608-615.
Liu Jiaxu，Zhou Qiaoling，Zhou Jingjie，et al. Ultrashort optical pulse generation based on thin-film lithium niobate electro-optic modulators with slow-wave electrode [J]. Semiconductor Optoelectronics，2025，46(4)：608-615.

作者简介：

盛顺锋(1998—)，女，硕士研究生，工程师，主要研究方向为微波光子技术；

肖永川(1990—)，男，博士研究生，高级工程师，主要研究方向为微波光子组件设计、光电多芯片混合集成技术。