

# 聚合物波导微环陷波滤波器研究

韩秀友<sup>1,3</sup> 王凌华<sup>1,3</sup> 王 瑜<sup>1,3</sup> 邹 品<sup>1,3</sup> 谷一英<sup>1,3</sup> 王锦艳<sup>2,3</sup> 蹇锡高<sup>2,3</sup> 赵明山<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> 大连理工大学物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024  
<sup>2</sup> 大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116024  
<sup>3</sup> 大连理工大学光子技术研究中心, 辽宁 大连 116024

**摘要** 分析了全通型波导微环的滤波响应特性,该波导微环在耦合系数与微环周损耗满足临界耦合条件时可以实现陷波滤波功能。设计并制备了跑道形聚合物液态聚倍半硅氧烷(PSQ-L)波导微环谐振器。基于其陷波滤波功能,实现了 14.35 GHz 准单边带微波信号在长为 25 km 的光纤中传输,有效抑制了光纤色散导致的微波功率衰减问题。为进一步提高陷波滤波的灵活性,采用马赫-曾德尔干涉(MZI)结构代替传统定向耦合器。通过改变干涉臂和环波导上加热电极的功率实现了微环耦合状态(过耦合、临界耦合、欠耦合)与谐振波长的灵活调谐,最大陷波深度为 12 dB,波长调谐效率为 8.2 pm/mW。

**关键词** 集成光学;聚合物波导微环;陷波滤波;微波光纤传输

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0706006

## Research of Notch Filter Based on Polymer Micro-Ring Waveguide

Han Xiuyou<sup>1,3</sup> Wang Linghua<sup>1,3</sup> Wang Yu<sup>1,3</sup> Zou Pin<sup>1,3</sup> Gu Yiyong<sup>1,3</sup>

Wang Jinyan<sup>2,3</sup> Jian Xigao<sup>2,3</sup> Zhao Mingshan<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology,  
Dalian, Liaoning 116024, China

<sup>2</sup> School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

<sup>3</sup> Photonics Research Center, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

**Abstract** According to the filter response analysis of the all-pass waveguide micro-ring, the notch filtering function can be achieved when the relationship between the coupling coefficient and the round trip loss meets the critical coupling condition. The micro-ring resonator based on polymer polysiloxane-liquid (PSQ-L) racetrack waveguide is designed and fabricated. With its notch filtering function, the power fading effect induced by the dispersion is suppressed effectively and the quasi-single sideband light-wave carried radio frequency (RF) signal of 14.35 GHz is transmitted through 25 km single mode fiber successively. To improve the flexibility of notch filtering, the conventional direction coupler is substituted with a Mach-Zehnder interferometer (MZI). The micro-ring coupling states, such as over, critical, and under coupling, and the resonant wavelength are tuned agilely by altering the power applied to the heating electrodes on the arm of MZI and the ring waveguide. The maximum notch depth is 12 dB, and the wavelength tuning efficiency is 8.2 pm/mW.

**Key words** integrated optics; polymer waveguide micro-ring; notch filter; radio over fiber

**OCIS codes** 130.5460; 350.2460; 350.4010

## 1 引 言

波导微环谐振器具有优异的滤波性能、紧凑的

结构、高度的集成性等优点,以它为主体可以构成各种不同功能的集成光子学器件,如光分插复用器、色

收稿日期: 2013-03-26; 收到修改稿日期: 2013-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(60807015, 60577014, 61077015)、国家 863 计划(2012AA040406)、教育部博士点基金(200801411037)、辽宁省自然科学基金(20102020)、中央高校基本科研业务费专项(DUT13JB01)

作者简介: 韩秀友(1977—),男,博士,副教授,主要从事集成光电子器件、聚合物光子学与微波光子学等方面的研究。

E-mail: xyhan@dlut.edu.cn

散补偿器、光开关、高速调制器、光波导传感器等。在实现新一代全光通信系统和集成光学传感器系统中这些器件具有十分重要和广阔的应用前景<sup>[1-4]</sup>。尤其是近年来随着微波光子信号处理技术的小型化、多功能集成发展的迫切需求<sup>[5-7]</sup>，基于波导微环结构的光延时线、相移器、信道化器、滤波器等集成波导微波光子信号处理器件的研究受到极大关注并取得重要进展<sup>[8-11]</sup>。

集成波导微波光子信号处理器多采用绝缘体上硅(SOI)、二氧化硅、半导体等材料来制备<sup>[7]</sup>。这些波导材料及其功能器件具有各自的特点与优势，如SOI波导的高集成度(高折射率差)、二氧化硅波导的低损耗及其与光纤的高耦合效率、半导体波导的电致发光与光电转换特性等。同时其他科研人员也正在进行深入的研究，以期获得某一种材料兼具上述各种优势，进而实现光源、调制器、光电探测器、信号处理单元等器件的单片集成<sup>[12]</sup>。

有机聚合物是一类极具性能优势和应用前景的光子学材料，它具有成本低、成膜性好、低损耗、高热光系数等优点，尤为重要是基于聚合物材料的良好工艺兼容性可将半导体光源与探测器、铌酸锂调制器、二氧化硅等信号处理单元集成在同一聚合物平面上<sup>[13-14]</sup>，充分发挥各种光波导材料与器件的优势，获得微波光子信号处理器的小型化与多功能集

成<sup>[15-16]</sup>。基于聚合物的高热光系数、低损耗和高非线性等特性，聚合物热光调谐滤波器、超长波导光延时线、高频调制器、光学模数转换器等光波导微波光子器件研究受到极大关注并取得重要进展<sup>[17-21]</sup>，为提高微波光子信号处理系统性能提供了有力支撑。

本文对全通型波导微环谐振器的滤波特性进行了研究，分析了耦合系数与微环周损耗对陷波滤波性能的影响。基于液态聚倍半硅氧烷(PSQ-L)聚合物材料<sup>[22]</sup>，设计制备了跑道形波导微环谐振器，对其陷波滤波特性在微波光纤传输系统中的应用进行了探索研究，实验上获得了 14.35 GHz 微波信号在 25 km 的单边带光纤中传输。针对全通型波导微环在实现大陷波深度方面存在的困难，采用马赫-曾德尔干涉(MZI)结构代替定向耦合器，设计制备了可调波导微环原型器件，实验上获得了微环耦合状态与谐振波长的调谐，这为聚合物光波导器件在微波光子技术领域的应用奠定了良好的基础。

## 2 全通型波导微环特性

全通型波导微环谐振器结构如图 1(a)所示，由直波导与环形波导耦合构成，该环形波导可以是圆形、跑道形、圆盘等，直波导与环波导的耦合可以采用共面耦合或垂直耦合方式。

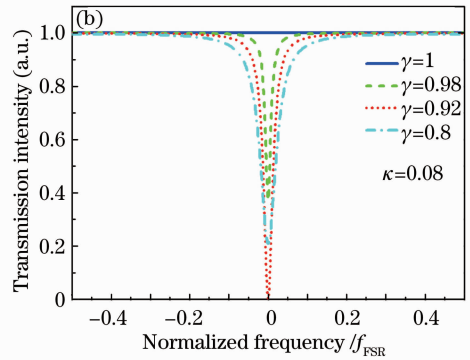
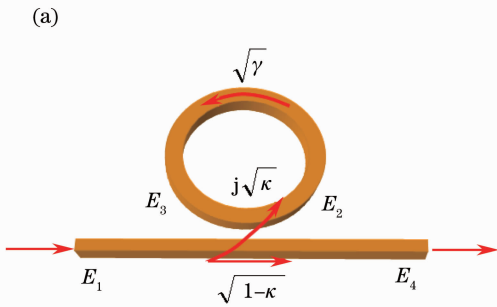


图 1 全通型波导微环。(a)结构示意图；(b)滤波响应曲线

Fig. 1 All-pass micro-ring waveguide. (a) Structure diagram; (b) filtering response curve

根据传输矩阵法，在考虑波导损耗的条件下，电场  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  和  $E_4$  满足

$$\begin{bmatrix} E_2 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\sqrt{\kappa} & \sqrt{1-\kappa} \\ \sqrt{1-\kappa} & j\sqrt{\kappa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$E_3 = \sqrt{\gamma} \exp(-j2\pi fT) E_2. \quad (2)$$

式中  $\kappa$  为交叉强度耦合系数， $f$  为光波频率， $\gamma$  为环波导的周损耗因子(无损耗时  $\gamma = 1$ ，有损耗时  $\gamma < 1$ )， $T$  为光波绕环一周的延时量。通常微环的自由

光谱范围(FSR,  $f_{FSR}$ )为  $1/T$ 。由(1)式和(2)式推导得出波导微环谐振器的归一化强度传输函数可以表示为

$$I(f) = \left| \frac{E_4}{E_1} \right|^2 = \frac{(1-\kappa) - 2\sqrt{1-\kappa}\sqrt{\gamma}\cos(2\pi fT) + \gamma}{1 - 2\sqrt{1-\kappa}\sqrt{\gamma}\cos(2\pi fT) + (1-\kappa)\gamma}. \quad (3)$$

由(3)式可以看出，忽略环波导的损耗时(即  $\gamma = 1$ )，

由直波导耦合进入环波导的光波最终将完全从环波导耦合输出,在频谱上输出均一值[如图 1(b)中实线所示],通常称该结构的波导微环为全通型。实际制备的波导微环器件,由于波导材料本身的吸收损耗、波导表面粗糙造成的散射损耗、直波导与弯曲波导的对接模式失配损耗等因素, $\gamma \neq 0$ ,因此其输出频谱呈现周期性凹陷,即谐振频率处光波输出强度被衰减,从而使得微环谐振器具有陷波滤波功能。当耦合系数与周损耗因子满足

$$\kappa = 1 - \gamma, \quad (4)$$

谐振频率处光波的抑制程度(或称作陷波深度)达到最大,(4)式称作临界耦合条件<sup>[23]</sup>。利用微环谐振器的陷波滤波功能,可以对某一频率的光波实现抑制或滤除作用。

### 3 聚合物波导微环谐振器及其陷波滤波功能应用

#### 3.1 微纳压印聚合物波导微环谐振器

基于课题组研发的新型聚合物 PSQ-L 光波导材料<sup>[22]</sup>,设计了跑道型微环谐振器,如图 2 所示,其中图 2(a)为其结构示意图,图 2(b)为其波导横截面示意图。环波导弯曲半径  $R=400 \mu\text{m}$ ,耦合区直波

导长度  $L=150 \mu\text{m}$ ,耦合区间距  $G=1 \mu\text{m}$ 。波导横截面为倒脊形,脊宽  $w=3 \mu\text{m}$ ,脊高  $h_1=2 \mu\text{m}$ ,平板层厚度  $h_2=0.8 \mu\text{m}$ ,波导芯层折射率  $n_1=1.52$ ,包层折射率  $n_2=1.45$ 。利用该材料良好的光固化特性,可采用紫外微纳压印技术制备原型器件<sup>[24]</sup>。与传统的压印波导芯层结构工艺不同,首先压印包层沟道结构[该压印结构的扫描电子显微镜(SEM)照片如图 2(c)所示],然后通过旋涂法将芯层材料填充于包层沟道中[该填充芯层波导 SEM 照片如图 2(d)所示]。这种波导结构设计制备工艺可有效控制  $h_2$ ,达到低损耗、单模传输要求。

图 3 给出了 TE 模式下制备的跑道形聚合物波导微环原型器件的传输光谱测试曲线。该微环谐振器的自由光谱范围为  $0.582 \text{ nm}$ ,半峰全宽(FWHM)为  $0.077 \text{ nm}$ 。通过谐振波长与 FWHM 可以计算出微环品质因子  $Q$  约为  $2.0 \times 10^4$ 。根据(3)式,通过数据拟合可以得到耦合器交叉强度系数  $\kappa \approx 0.42$ ,表示进入波导的光波有 42% 的功率由直波导耦合进入微环之中;周损耗因子  $\gamma \approx 0.78$ ,表示绕环一周后有 22% 的光功率被损耗掉。由  $\kappa$  与  $\gamma$  之间的关系可知,微环处于过耦合状态( $\kappa > 1 - \gamma$ ),此时输出端口的陷波深度约为 8 dB。

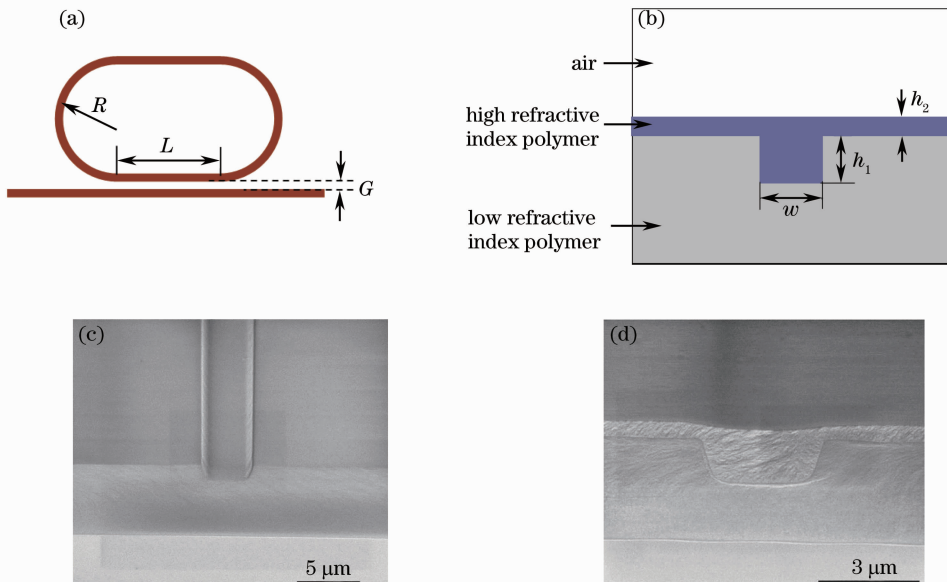


图 2 跑道型微环谐振器。(a)结构示意图;(b)波导横截面;(c)压印沟道结构 SEM 照片;(d)填充芯层波导 SEM 照片  
Fig. 2 Runway type micro-ring resonator. (a) Structural diagram; (b) waveguide cross section; (c) SEM picture of imprinted trench; (d) SEM picture of core layer filled waveguide

#### 3.2 基于微环陷波滤波的准单边带微波光纤传输

微波光纤传输(RoF)技术将微波信号调制到光载波上,利用光纤的低损耗、大带宽优势,实现微波

信号的远距离高效传输<sup>[5]</sup>。由于普通单模光纤存在色度色散,基于强度调制的双边带(DSB)光载微波信号,经过长距离光纤传输后,探测得到的微波功率

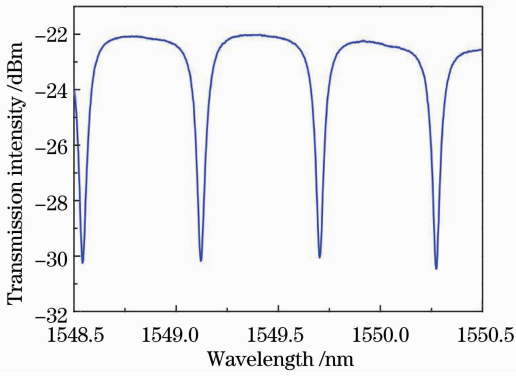


图 3 聚合物波导微环谐振器的传输光谱 (TE 模式)

Fig. 3 Transmission spectrum of the micro-ring resonator based on polymer waveguide (TE mode)

将发生衰减。微波功率衰减程度随着累积色散的增加而增大,当微波频率与累积色散的乘积满足一定条件时,微波功率将衰减为零<sup>[25]</sup>,这将严重影响微

波光纤传输系统的性能。采用单边带传输可避免色散导致的微波功率衰减效应<sup>[25]</sup>。

利用波导微环的陷波滤波特性,设置微波调制光载波的一个边带位于微环的谐振频率处,来抑制该边带的功率,实现准单边带(quasi-SSB)微波光纤传输。图 4 给出了实验测试系统框图。由可调谐激光器(TLS)输出的光波输入电光强度调制器(EOM),由微波信号源(RFS)输出频率  $f=14.35$  GHz 的微波信号经 EOM 调制到光载波上,微波调制光载波输入聚合物波导微环,掺铒光纤放大器(EDFA)用来补偿透镜光纤与波导的耦合损耗以及偏振控制器(PC)的插入损耗。经过单模光纤传输的光载微波信号由光电探测器(PD)进行光电转换,然后由频谱仪(RFSA)解调测试。图 4 同时给出了经微环滤波前、后光载微波信号的光谱图,可以看出右边带相比左边带被抑制了约 8 dB。

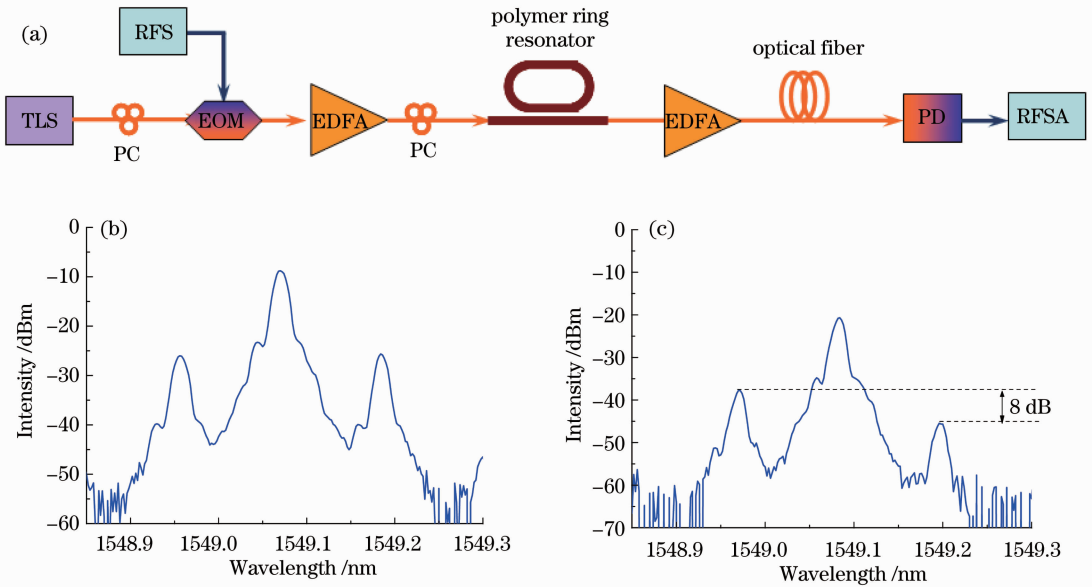


图 4 (a)基于微环滤波的 RoF 实验系统框图;(b)进入微环之前的光载微波信号(DSB);(c)经微环之后的光载微波信号(quasi-SSB)

Fig. 4 (a) Schematic diagram of the RoF experimental system with the ring resonator as a notch filter; the spectra of the light-wave carried RF signal (b) before and (c) after the ring resonator

为了验证微环 quasi-SSB 滤波对 RoF 系统性能的改善效果,将 20 MS/s 的正交相移键控(QPSK)信号调制到 14.35 GHz 的微波上,经过 25 km 单模光纤传输,分别测试有、无微环滤波下的接收信号。作为对比,无波导微环滤波下的 DSB 微波光纤传输,用可调谐光衰减器等效微环器件的插入损耗。图 5 给出了两种情况下接收信号由 RFSA 分析得

到的星座图和信号频谱图。对于 DSB 传输,经过 25 km 单模光纤传输后,信号质量劣化严重,误差矢量幅度(EVM)由 4.6% 增大为 54.4%,信噪比(SNR)由 26.6 dB 降为 5.2 dB。采用波导微环滤波的 quasi-SSB 信号,经过 25 km 单模光纤传输,EVM 为 9.9%,SNR 为 20.6 dB,其信号质量基本保持不变。

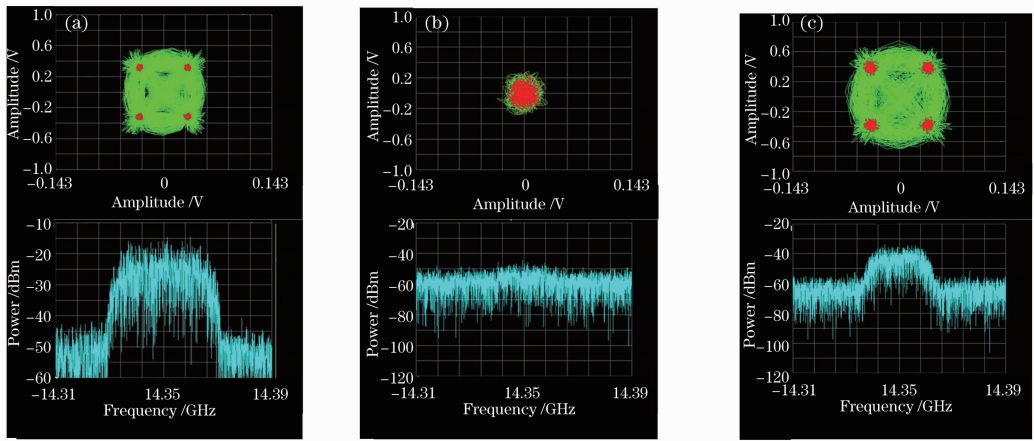


图 5 有、无微环滤波的微波光纤传输后的信号星座图(上)和信号噪声谱图(下)。(a)调制器输出的信号；(b)双边带(未经微环滤波)和(c)准单边带(经微环滤波)经光纤传输之后的信号

Fig. 5 Constellations (up) and spectrograms (down) of received signal through the RoF system. (a) Output signal from the modulator; (b) DSB signal (without ring resonator) and (c) quasi-SSB signal (with ring resonator) transmission after 25 km single mode fiber

## 4 可调聚合物波导微环谐振器

### 4.1 可调波导微环结构

从以上制备的聚合物波导微环输出光谱和陷波滤波应用来看,其陷波深度仅为 8 dB,未能达到对光载微波信号边带的完全抑制,这主要是由于  $\kappa$  与  $\gamma$  未能达到匹配临界耦合条件<sup>[23]</sup>。由定向耦合器构成的波导微环,尽管前期设计中仔细考虑了波导损耗并精心设计了定向耦合器的结构参数,使得微环工作在临界耦合状态,以期获得更大的陷波深度。但是,实际制备的波导器件与设计值存在偏差,因此对器件设计与制备工艺提出了十分严格的要求。为了降低波导设计与制备工艺的难度,同时增加波导微环滤波应用的灵活性,采用 MZI 结构代替传统的定向耦合器,来构成耦合系数可调的波导微环。

图 6(a)给出了可调波导微环的结构示意图。利用聚合物材料的高热光系数特性,通过改变 MZI 一臂上的加热电极功率,可以调节 MZI 两臂的相位差,获得等效耦合系数的调谐;改变环波导上的加热电极功率,可以调谐微环的谐振频率,获得陷波滤波频率的调谐。该结构图的具体设计参数如下: MZI 的臂长为 1000  $\mu\text{m}$ ; 3 dB 定向耦合器的波导耦合间距为 1  $\mu\text{m}$ ,耦合长度为 58  $\mu\text{m}$ ;微环的弯曲半径为 500  $\mu\text{m}$ ;连接 3 dB 耦合器和微环弯曲波导的是若干 S 型弯曲结构波导, S 型弯曲波导的弯曲半径设计为 1400  $\mu\text{m}$ ,弯曲角度设计为 12°; MZI 上的加热电极宽度为 5  $\mu\text{m}$ ,长度为 1000  $\mu\text{m}$ ;微环波导上的加热电极宽度为 10  $\mu\text{m}$ ,长度为 2000  $\mu\text{m}$ 。采用紫外

微纳米压印工艺和剥离工艺分别制备聚合物波导和加热电极,获得可调聚合物波导微环原型器件[如图 6(b)所示]。

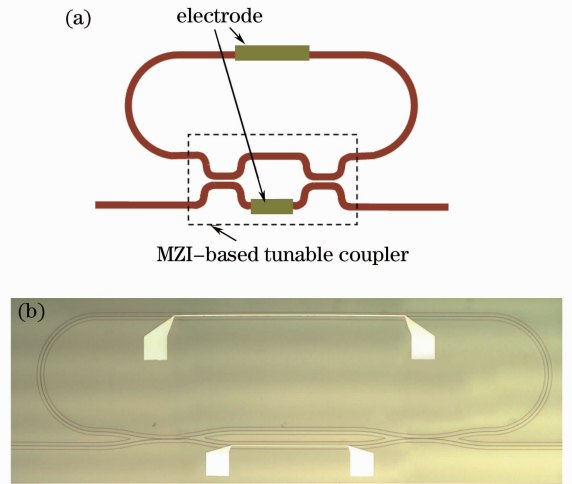


图 6 基于 MZI 耦合器的可调波导微环。(a)结构示意图; (b)光学显微镜照片

Fig. 6 Tunable ring resonator based on MZI coupler.

(a) Structure diagram; (b) optical microscope picture

### 4.2 可调波导微环滤波特性

对制备的可调聚合物波导微环原型器件进行测试。只对 MZI 臂上的电极施加电流,微环输出光谱随注入电极功率的变化如图 7 所示。首先,输入直波导中的大部分光能量都耦合进微环波导之中,微环谐振器工作在过耦合状态。虽然理论上在电极功率为零的情况下,微环应处于非谐振状态,但是由于制备工艺的误差,构成 MZI 的两个 3 dB 定向耦合

器的分光比不是严格的 50:50,这就导致了特性曲线在电极功率为零的情况下,出现了陷波深度约为 1 dB 的凹陷。其次,改变 MZI 臂上电极的注入电流,使 MZI 耦合器的  $\kappa$  发生改变,当耦合进微环谐振器的光能量等于周损耗时,微环达到临界耦合状态,这时器件工作的陷波深度最高(12 dB)。进一步增加电极功率可使微环谐振器工作在欠耦合状态。值得注意的是,在通过加热电极功率改变有效  $\kappa$  的过程中,MZI 臂上的相移会对微环产生一个附加相位<sup>[26]</sup>,从而使得器件的工作波长向短波长方向漂移。在实际应用中可以通过对环波导施加一定的相移量(由环波导上的电极来完成),来抵消该附加相移的作用,使得在实现陷波深度调谐的过程中,微环的谐振波长保持不变。

对波导微环的滤波频率调谐特性进行了测试。调节加载至 MZI 臂上电极的功率,使其工作在陷波深度最大的状态,然后改变施加在环波导上电极功率的大小,测量微环的输出光谱,结果如图 8 所示。由图 8(a)可以看出,随着环波导上注入功率的增加,微环谐振波长向短波方向移动,这是由聚合物材料的负热光系数造成的。环波导上电极功耗为

19.5 mW 时,可以实现一个自由光谱范围(约 0.16 nm, 20 GHz)的调谐。波导微环谐振波长长漂移量随电极功率变化的关系曲线如图 8(b)所示,可以看出谐振波长漂移量与电极功率呈良好的线性关系,谐振波长的调谐效率约为 8.2 pm/mW。在实际应用中,可以通过控制 MZI 臂上电极和环波导上的电极功率,在最大陷波深度条件下获得陷波滤波频率的灵活调谐。

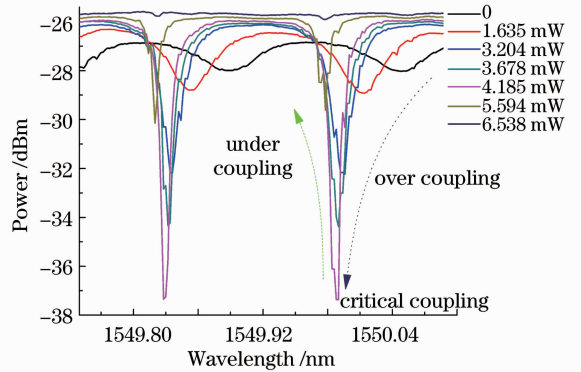


图 7 聚合物波导微环输出光谱随注入电极功率变化情况

Fig. 7 Output spectra versus electrode power of the polymer micro-ring waveguide resonator

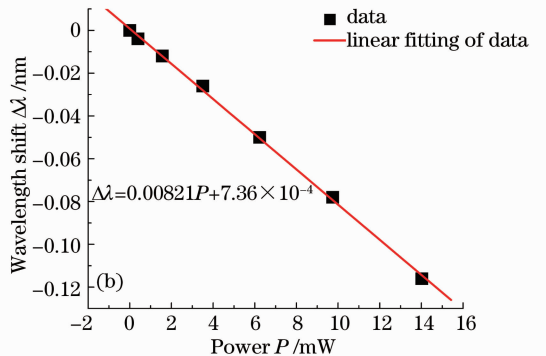
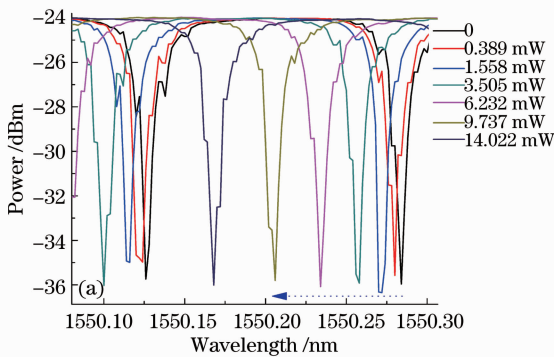


图 8 聚合物波导微环陷波调谐特性。(a) 滤波响应随电极功率的变化; (b) 谐振波长随电极功率的变化  
Fig. 8 Notch tuning features of the polymer micro-ring waveguide. (a) Filter response versus the power of electrode; (b) resonant wavelength versus the power of electrode

## 5 结 论

对全通型波导微环的陷波滤波功能进行了理论分析与实验研究。设计制备了跑道形聚合物 PSQ-L 波导微环谐振器,其陷波深度达 8 dB。基于该微环滤波的 quasi-SSB 光载微波信号有效抑制了光纤色散导致的微波功率衰减问题,实现了长距离光纤(25 km)传输。针对传统定向耦合器结构波导微环在获得大陷波深度时波导设计与制备的复杂性与高

难度问题,采用 MZI 可调耦合器,制备出微环原型器件。通过改变干涉臂和环波导上电极的输入功率实现了微环耦合状态(过耦合、临界耦合与欠耦合)与谐振波长的灵活调谐,最大陷波深度达 12 dB,波长调谐效率为 8.2 pm/mW。这为波导微环陷波滤波功能的实现与应用提供了有益参考。

## 参 考 文 献

1 Otto Schwelb. A decade of progress in microring and microdisk

- based photonic circuits: a personal selection [C]. SPIE, 2008, 6872: 68720H.
- 2 Xudong Fan, Ian M White, Hongying Zhu, *et al.*. Overview of novel integrated optical ring resonator bio/chemical sensors [C]. SPIE, 2007, 6452: 64520M.
  - 3 D V Katrien, B Irene, S Etienne, *et al.*. Silicon-on-insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing [J]. Opt Express, 2007, 15(12): 7610–7615.
  - 4 Linghua Wang, Jun Ren, Xiyou Han, *et al.*. A label-free optical biosensor built on a low cost polymer platform [J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(3): 920–930.
  - 5 J Capmany, D Novak. Microwave photonics combines two worlds [J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319–330.
  - 6 J Capmany, J Mora, I Gasulla, *et al.*. Microwave photonic signal processing [J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(4): 571–586.
  - 7 D A I Marpaung, C G H Roeloffzen, R G Heideman, *et al.*. Integrated microwave photonics [J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 7(1): 1–33.
  - 8 R Meijerink, C G H Roeloffzen, A Meijerink, *et al.*. Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas—part II: experimental prototype [J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(1): 19–31.
  - 9 Chang Qingjiang, Li Qiang, Zhang Ziyang, *et al.*. A tunable broadband photonic RF phase shifter based on a silicon microring resonator [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2009, 21(1): 60–62.
  - 10 A P Goutzoulis. Integrated Optical Channelizer [P]. US Patent 7421168, 2007.
  - 11 Dengke Zhang, Xue Feng, Yidong Huang. Simulation of 60-GHz microwave photonic filters based on serially coupled silicon microring resonators [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(2): 021302.
  - 12 Zhiping Zhou, Zhijuan Tu, Bing Yin, *et al.*. Development trends in silicon photonics [J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(1): 012501.
  - 13 H Ma, A K Y Jen, L R Dalton. Polymer-based optical waveguides—materials, processing, and devices [J]. Adv Mater, 2002, 14(19): 1339–1365.
  - 14 L Eldada. Advances in polymer-based dynamic photonic components, modules, and subsystems [C]. SPIE, 2006, 6351: 63510Y.
  - 15 R Waterhouse, D Novak. Efficient antenna/electro-optic front-ends for fiber radio applications [C]. IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2008. 81–82.
  - 16 J Wang, C Zawadzki, N Mettbaach, *et al.*. Polarization insensitive 25-Gbaud direct D(Q)PSK receiver based on polymer planar lightwave hybrid integration platform [J]. Opt Express, 2011, 19(13): 12197–12207.
  - 17 G D Kim, S S Lee. Photonic microwave channel selective filter incorporating a thermo-optic switch based on tunable ring resonators [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(13): 1003–1005.
  - 18 Changming Chen, Yunji Yi, Fei Wang, *et al.*. Ultra-long compact optical polymeric array waveguide true-time-delay line devices [J]. J Quantum Electron, 2010, 46(5): 754–761.
  - 19 B Howley, X Wang, M Chen, *et al.*. Reconfigurable delay time polymer planar lightwave circuit for an X-band phased-array antenna demonstration [J]. J Lightwave Technol, 2007, 25(3): 883–890.
  - 20 M Lee, H E Katz, C Erben, *et al.*. Broadband modulation of light by using an electro-optic polymer [J]. Science, 2002, 298(5597): 1401–1403.
  - 21 Qianshu Zhang, Yongzhi Liu, Jinkun Liao, *et al.*. Design and simulation of a narrow passband electro-optical tunable filter with band-pass and band-rejection output [J]. J Infrared, Milliwaves, 2009, 30(9): 959–968.
  - 22 H B Zhang, J Y Wang, L K Li, *et al.*. A study on liquid hybrid material for waveguides—synthesis and property of PSQ-Ls for waveguides [J]. J Macromolecular Science Part A-Pure and Appl Chem, 2008, 45(3): 232–237.
  - 23 A Yariv. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides [J]. Electron Lett, 2000, 36(4): 321–322.
  - 24 Jie Teng, Stijn Scheerlinck, Hongbo Zhang, *et al.*. A PSQ-L polymer microring resonator fabricated by a simple UV-based soft-lithography process [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2009, 21(18): 1323–1325.
  - 25 U Gliese, S Ngrskov, T N Nielsen. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1996, 44(10): 1716–1724.
  - 26 Zhang Jianing, Han Xiyou, Song Hongyan, *et al.*. Study on time delay characteristics of integrated waveguide microring resonator with tunable coupler [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2098–2103.
- 张佳宁, 韩秀友, 宋红妍, 等. 可调耦合器结构集成波导微环谐振腔延时特性研究 [J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2098–2103.

栏目编辑: 王晓琪