

类 Sagnac 干涉仪结构的三维多微环谐振滤波器

张福领¹, 翟珊², 潘俊², 冯吉军^{2*}

¹中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047;

²上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093

摘要 Sagnac 干涉仪在光学滤波领域有着重要应用。基于三维氮化硅波导平台, 利用双层的多微环系统实现了新型类 Sagnac 谐振滤波系统, 其中底层主微环腔分别与顶层输入/输出波导和单/双子微环实现了反馈耦合。光经耦合区域产生了两束相向传输并互相干涉的光波, 从而实现了滤波波形和谐振峰位可调的滤波结构。基于传输矩阵和迭代方法分析输出光谱, 通过改变波导与微腔的耦合系数设计输出光谱波形, 利用金属加热电极调制主微腔的相位以调控谐振峰位。理论分析和实验表征结果表明, 通过增加顶层子微环数可有效增强器件的密集滤波效果, 此三维集成结构可提供更多的设计自由度。相关的多微环谐振滤波系统可以广泛应用于光通信和光传感等领域。

关键词 集成光学; Sagnac 效应; 集成光子器件; 微环谐振器; 氮化硅

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1113003

Three-Dimensional Multi-Microring Resonance Filter Based on Sagnac-Like Interferometer

Zhang Fuling¹, Zhai Shan², Pan Jun², Feng Jijun^{2*}

¹The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou, Henan 450047, China;

²Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract Sagnac interferometers have important applications in the field of optical filtering. Based on the 3D silicon nitride waveguide platform, we obtained a new Sagnac-like resonance filter system by using a two-layer multi-microring system. In the new system, the bottom main microring cavity was coupled via feedback with the top input/output waveguide and the single/double sub-microrings, respectively. Furthermore, two light waves transmitting in the opposite direction were generated in the coupling area and interfered with each other, thereby a filter structure with adjustable filtering waveforms and resonance peak positions is realized. In this paper, a transmission matrix and an iteration method were used to analyze the output spectra, and the output waveform was designed by changing the coupling coefficient between the waveguide and the microcavity. Besides, the phase of the main microcavity was modulated by the metal heating electrode to regulate the resonance peak position. The theoretical analysis and experimental characterization results show that the dense filtering effect of the device can be effectively improved by adding top sub-microrings and thus the 3D integrated structure can provide greater design freedom. The related multi-microring resonance filter system can be widely used in optical communication, optical sensing, and other fields.

Key words integrated optics; Sagnac effect; integrated photonic devices; microring resonators; silicon nitride

OCIS codes 130.3120; 120.5790

1 引言

光学滤波器作为重要的光器件, 可以广泛应用于光通信和密集波分复用系统^[1-4]。一般滤波器结

构是基于光学微腔^[5-7]或干涉原理, 如马赫-曾德尔干涉^[8]、迈克耳孙干涉^[9]和萨格纳克(Sagnac)干涉^[10]等。其中, 马赫-曾德尔干涉和迈克耳孙干涉是利用不同的臂长产生光程差, 容易引入其他噪声。

收稿日期: 2020-04-23; 修回日期: 2020-05-21; 录用日期: 2020-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(61705130, 11774235, 11727812, 11933005)、上海市自然科学基金(17ZR1443400)、上海市青年科技启明星(19QA1406100)、上海高校特聘教授(东方学者)岗位计划

* E-mail: fjijun@usst.edu.cn

而 Sagnac 干涉是利用同一环路中相向传输光束间的相互干涉,具有结构简单^[11-12]、灵敏度高^[13]、对光源相干性要求低^[14]和抑制噪声^[15]等优点,已经被广泛应用于各种光学系统中^[16-17]。

基于不同光学材料的 Sagnac 滤波器已得到广泛研究,如光纤^[18-19]、绝缘体上硅^[20]和聚合物^[21]等。除此之外,氮化硅也是一种用于制造光滤波器的优良材料。它具有明显的非线性吸收,可以应用在各种线性和非线性系统中^[22-23]。同时,传输和耦合损耗较低,造价低廉,且与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容^[24-27],易于实现三维集成^[28]。三维结构相较于平面结构,尺寸小,集成度高,能有效提高器件的制造容忍度。

基于 Sagnac 干涉原理的三维集成滤波器已经被报道^[27]。顶层弯曲波导耦合底层跑道环形谐振器,利用波导与谐振器的耦合系数变化来实现不同的输出波形设计。光由顶层弯曲波导输入,经过耦合区域在器件中形成顺时针和逆时针传输光束,最终在输出端干涉输出,实现了滤波效果。利用器件上方的金属加热电极可有效调制输出光谱的谐振偏移。但随着光网络的发展,期待设计出具有窄带宽和密集滤波效果的光滤波器。因此,本文结合多微环耦合和 Sagnac 干涉结构,提出了单子微环和双子微环谐振滤波系统。子微环的增

加有效增强了器件的密集滤波效果和器件的主动控制特性,并增加了调节自由度。下文将分别从设计、制造和表征三个方面详细介绍单子微环和双子微环滤波器。

2 器件原理

三维多微环谐振滤波系统由底层跑道环形谐振器耦合上层弯曲波导和子微环组成。图 1 分别给出了单子微环谐振滤波系统和双子微环谐振滤波系统结构示意图。图 1(a)为普通的底层微腔耦合顶层弯曲波导结构,其中微腔两侧 cmp1 和 cmp2 表示接入底层谐振器的两个半圆结构, E_{in} 为输入光波的振幅, E_{out} 为输出光波的振幅。图 1(b)表示 U 型弯曲波导耦合的子微环结构。利用迭代的方法用图 1(b)代替图 1(a)中 cmp2 结构,得到底层微腔耦合上层波导和微环的单子微环谐振滤波系统,如图 1(c)所示。用 U 型弯曲波导耦合子微环结构代替 cmp1 和 cmp2,得到双子微环谐振滤波器,如图 1(d)所示。器件上各位置的波导长度分别用 L_i 表示,其中, L_1 代表顶层弯曲波导长度, L_2 代表底层谐振腔的半周长, L_3 代表顶层单子微环周长。在图 1(b)中,6 与 7 两点间的反馈波导标记成 L_4 ,端点 A 到耦合点 5 的长度是 L_5 ,端点 B 到耦合点 6 的长度是 L_6 。波导与微腔的耦合长度由 L_c 表示。

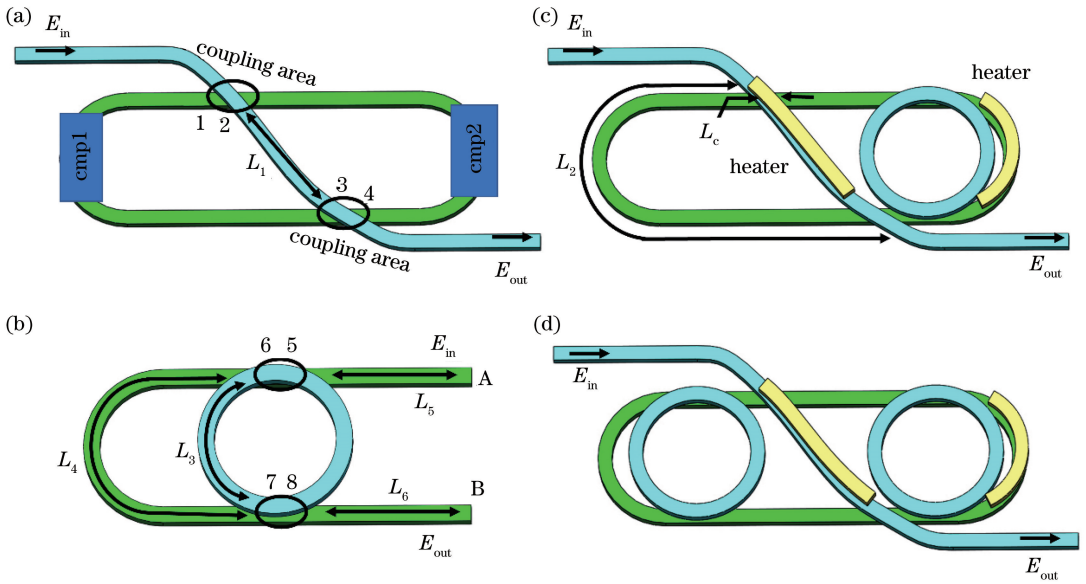


图 1 器件结构示意图。(a)顶层波导与底层微腔耦合示意图;(b)子微环与底层 U 型波导耦合示意图;
(c)单子微环谐振滤波系统示意图;(d)双子微环谐振滤波系统示意图

Fig. 1 Schematic of device. (a) Schematic of top-layer waveguide coupled with bottom-layer resonator; (b) schematic of sub-microring coupled with bottom-layer U-bend waveguide; (c) schematic of single sub-microring resonance filter; (d) schematic of double sub-microring resonance filter

设计波导宽度和厚度分别为 $1.5 \mu\text{m}$ 和 $0.2 \mu\text{m}$ 。子微环与底层跑道半圆直径均是 $200 \mu\text{m}$ ，微环尺寸直接影响输出光谱的密集滤波效果，微环尺寸越小，光谱越密集。光由顶层弯曲波导输入，在输入耦合区域(1,2 耦合点位置)与底层跑道环形谐振器耦合。一部分光耦合进底层微腔，另一部分光继续在弯曲波导中传播，形成顺时针和逆时针两种传输模式。其中，逆时针光路经过底层微腔耦合子微环结构[即图 1(b)结构]，进入弯曲波导传输，然后再次耦合进底层微腔，传播到输出耦合区域。顺时针光路经过顶层波导传输到输出耦合区(3,4 耦合点位置)，并与逆时针光束发生干涉，实现了谐振滤波。此处逆时针的传输光路也是先经过顺时针传输到达耦合区域(3,4 耦合点位置)，进入弯曲波导，再通过耦合点 2,1 逆时针耦合进底层微腔。因为自耦和结构的特异性，光束传输只能由顺时针到逆时针传输，而不能反向耦合。因此来自同一光源的两束光，经过不同路径形成固定的光程差。在各种光学器件研究中，传输矩阵方法已被证明是分析微腔输出光谱的有效方法^[29-32]。对氮化硅耦合器件进行分析，得到图 1(a)所示结构的透射系数 t_0 。

$$\begin{pmatrix} E_2^{R+} \\ E_2^{W+} \\ E_1^{R-} \\ E_4^{W+} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -ik_1 & t_1 & 0 & 0 \\ t_1 & -ik_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_1^{W+} \\ E_1^{R+} \\ E_1^{R-} \\ E_4^{W+} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} E_3^{W-} \\ E_4^{R+} \\ E_3^{R-} \\ E_4^{W+} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \exp(-i\theta_1) & 0 & 0 \\ t_{\text{cmp2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_{\text{cmp1}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_2^{R+} \\ E_2^{W+} \\ E_1^{R-} \\ E_4^{W+} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} E_3^{W+} \\ E_4^{R-} \\ E_3^{R+} \\ E_4^{W-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -ik_1 & 0 & t_1 \\ -ik_1 & 0 & t_1 & 0 \\ 0 & t_1 & 0 & -ik_1 \\ t_1 & 0 & -ik_1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_3^{W-} \\ E_4^{R+} \\ E_3^{R-} \\ E_4^{W+} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} E_2^{R-} \\ E_2^{W-} \\ E_1^{R+} \\ E_4^{W-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & t_{\text{cmp2}} & 0 & 0 \\ \exp(-i\theta_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_{\text{cmp1}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_3^{W+} \\ E_4^{R-} \\ E_3^{R+} \\ E_4^{W-} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} E_1^{W-} \\ E_1^{R-} \\ E_1^{R+} \\ E_4^{W-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -ik_1 & t_1 & 0 & 0 \\ t_1 & -ik_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_2^{R-} \\ E_2^{W-} \\ E_1^{R+} \\ E_4^{W-} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$t_0 = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} = \exp(-i\theta_1) \cdot$$

$$\left[t_1^2 + \frac{2k_1^2 t_1^2 - k_1^4}{1 + t_1^2 t_{\text{cmp1}} t_{\text{cmp2}}} t_{\text{cmp1}} t_{\text{cmp2}} + \frac{2k_1^4 t_1^2 (t_{\text{cmp1}} t_{\text{cmp2}})^2}{(1 + t_1^2 t_{\text{cmp1}} t_{\text{cmp2}})^2} \right], \quad (6)$$

式中： $E_j^{W(-/+)}$ 表示在耦合点 j ($j=1,2,\dots,8$) 波导上的传输电场振幅； $E_j^{R(-/+)}$ 表示在耦合点 j ($j=1,2,\dots,8$) 微腔上的传输电场振幅；+ 表示顺时针能量传输过程；- 表示逆时针能量传输过程； k_1, t_1 表示波导与底层微腔的耦合系数和传输系数； θ_i 表示光经过弯曲波导 L_i 产生的相位变化； $t_{\text{cmp1}}, t_{\text{cmp2}}$ 表示光经过底层微腔 cmp1 和 cmp2 后的输出。对图 1(b) U 型弯曲波导与子微环耦合结构进行计算，由传输矩阵法得到透射系数 t_u 。

$$\begin{pmatrix} E_6^{W-} \\ E_6^{R-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_2 & -ik_2 \\ -ik_2 & t_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_5^{W-} \\ E_5^{R-} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} E_7^{W-} \\ E_7^{R-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \exp(-i\theta_4) & 0 \\ 0 & \exp(-i\theta_3) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_6^{W-} \\ E_6^{R-} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} E_8^{W-} \\ E_8^{R-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_2 & -ik_2 \\ -ik_2 & t_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_7^{W-} \\ E_7^{R-} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$E_5^{R-} = \exp(-i\theta_3) \cdot E_8^{R-}, \quad (10)$$

$$t_u = \frac{k_2^2 \exp(-i\theta_3) - t_2^2 \exp(-i\theta_4) + \exp[-i(2\theta_3 + \theta_4)]}{1 + k_2^2 \exp[-i(\theta_3 + \theta_4)] - t_2^2 \exp(-i2\theta_3) \exp[-i(\theta_5 + \theta_6)]}, \quad (11)$$

式中： k_2, t_2 表示微腔与微环的耦合系数和传输系数。利用迭代方法，将 t_u 代替 t_{cmp2} 得到单子微环谐振滤波系统输出光谱 t_1 ，将 t_u 同时代替 $t_{\text{cmp1}}, t_{\text{cmp2}}$ 得到双子微环谐振滤波系统输出光谱 t_2 。

$$t_1 = \exp(-i\theta_1) \cdot$$

$$\left[t_1^2 + \frac{2k_1^2 t_1^2 - k_1^4}{1 + t_1^2 t_{\text{cmp1}} t_u} t_{\text{cmp1}} t_u + \frac{2k_1^4 t_1^2 (t_{\text{cmp1}} t_u)^2}{(1 + t_1^2 t_{\text{cmp1}} t_u)^2} \right], \quad (12)$$

$$t_2 = \exp(-i\theta_1) \cdot$$

$$\left[t_1^2 + \frac{2k_1^2 t_1^2 - k_1^4}{1 + t_1^2 t_u^2} t_u^2 + \frac{2k_1^4 t_1^2 t_u^4}{(1 + t_1^2 t_u^2)^2} \right]. \quad (13)$$

基于 MATLAB 软件模拟单子微环谐振滤波系统输出光谱，如图 2 所示。改变波导与微腔的耦合

系数观察输出光谱变化。取耦合系数 k_1 分别为 0.4、0.6、0.8 和 1，耦合系数 k_2 固定为 0.35，得到的输出光谱为平坦的箱型滤波，且随着耦合系数的增加，谐振峰逐渐变宽并出现新的谐振分裂。基于 Sagnac 原理，器件中两个相向传输的模式光同时存在并发生干涉，输出波形中出现明显的类电磁感应透明现象(EIT)^[33]。但是随着耦合系数接近 1，密集的输出光谱消失，代替出现一个自由光谱范围较大的下陷峰，如图 2 中 $k_1=1$ 的输出光谱所示。耦合系数 k_1 接近 0 或者 1 时，器件中两种传输模式消失，不再发生干涉滤波，因此没有密集滤波光谱输出。观察 1549 nm 附近的输出光谱，不同耦合系数对应的消光比分别为 16 dB、25 dB、40 dB 和 12 dB，且相邻两个滤波通道的最大和最小带宽分别为 0.6 nm 和 0.3 nm。

在器件微环上方设计金属加热电极，利用热光效应实现谐振光谱的有效调制。模拟结果如图 3 所示，微腔的耦合系数 $k_1=0.6$ 、 $k_2=0.35$ ，通过加热电极来改变微腔的相位，可以观察到明显的谐振偏移。其中一个 π 相位变化可以实现 0.38 nm 的谐振红移，但在谐振分裂峰顶点处没有偏移量产生，如 1548.5 nm 和 1551 nm 处。这主要是每个谐振波长下相应的折射率不同，因此不同输出波长的静态光学相位不同。进一步对弯曲波导上的相位进行调制，得到的输出光谱没有发生谐振偏移。通过(12)式可以发现，弯曲波导上的相位变化对应式中 θ_1 的变化，仅引起传输损耗变化(输出图未给出)，因此无谐振偏移。

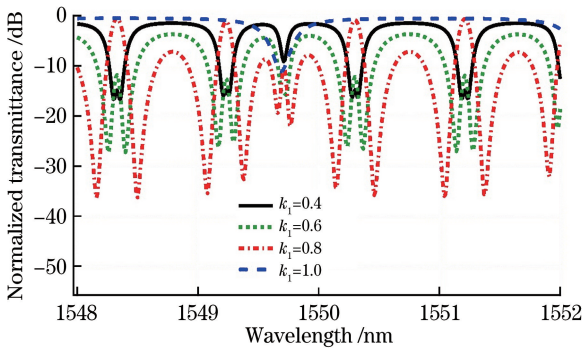


图 2 当 k_2 不变时不同 k_1 下的器件输出光谱

Fig. 2 Output spectra of device under different k_1 and fixed k_2

不同耦合系数下双子微环结构输出光谱的仿真结果如图 4 所示。波导与微腔的耦合系数分别取 0.4、0.6、0.8 和 1.0，微腔与微腔的耦合系数为 0.3，观察输出光谱发现，耦合系数较小时，得到平整

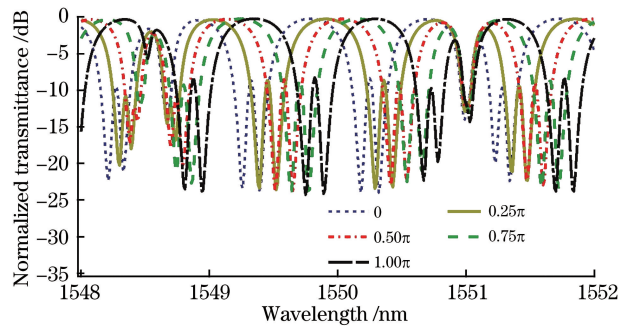


图 3 不同跑道环形谐振器相位下的单子微环器件输出光谱
Fig. 3 Output spectra of single sub-microring device under different phases of racetrack resonator

的箱型输出光谱。随耦合系数的增加，谐振峰下陷处出现新的透明峰，消光比逐渐增大。输出光谱的消光比也随波导耦合系数的增加而增加，在 1550 nm 附近得到的消光比分别为 16 dB、20 dB、34 dB 和 71 dB。耦合系数的变化引起两束光能量分布的变化，因此得到干涉输出波形变化，实现了输出波形调制。耦合系数 k_1 为 1 或者 0 时，其中一束光能量为零，Sagnac 干涉消失。如图 4 中 $k_1=1.0$ 的情况，此时器件被解分为微腔与 U 型波导耦合结构。密集输出光谱效果消失，观察到自由光谱范围(FSR)大约是 2 nm。在其他耦合情况，输出光谱相邻的谐振峰最宽约为 0.4 nm，最窄约为 0.25 nm。相比于单子微环结构，双子微环可以提供更密集的滤波效果，子微环个数的增加有效增加了器件的调节自由度。

图 5 给出了双子微环器件底层微腔谐振器的相位对输出光谱的影响。取耦合系数 k_1, k_2 分别为 0.60 和 0.30，通过改变微腔波导的相位，观察输出光谱。得到的谐振偏移量与相位呈线性相关，每 π 相位变化引起 0.6 nm 的谐振红移。但是在谐振分裂峰处只观察到输出光谱的轻微偏移，这主要是由输出波长的静态光学相位导致的。分析弯曲波导的相位对输出光谱的影响，由(13)式可知，弯曲波导上的相位变化对应 θ_1 的变化，仅影响输出光谱的传输损耗。因此，结构的上层弯曲波导不易受环境影响，适用于复杂环境下的探测等。

3 单子微环谐振滤波系统

3.1 制造工艺

三维微环谐振器件的制备流程可参考文献[34]。首先在干净的磷化钢衬底上生长二氧化硅(SiO_2)，由等离子体增强化学气象沉积(PECVD)得到 4 μm 厚的底层缓冲层。然后基于电子回旋共振

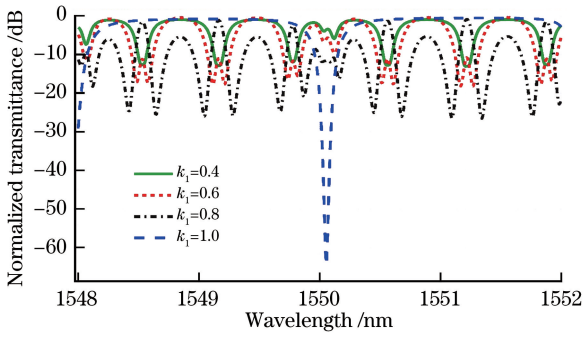


图 4 当 k_2 不变时,不同 k_1 下的
双子微环器件输出光谱图

Fig. 4 Output spectra of double sub-microring device under different k_1 and fixed k_2

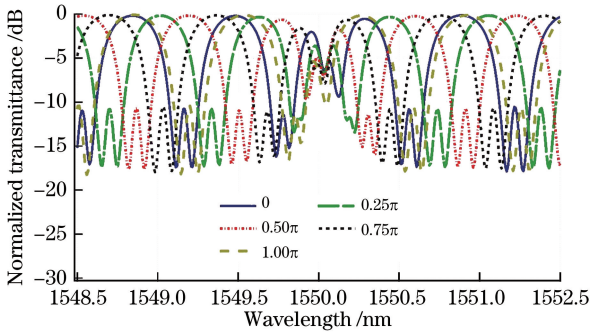


图 5 不同跑道环形谐振器相位下的双子微环器件输出光谱
Fig. 5 Output spectra of double sub-microring device under different phases of racetrack resonator

(ECR)溅射得到厚度为 200 nm 的中间芯层氮化硅 (Si_3N_4)。相对绝缘体上硅材料,氮化硅与 SiO_2 的折射率差更小,有利于制备紧凑的器件结构。在氮化硅表面进行匀胶、电子束光刻和刻蚀后得到微环波导结构。继续在波导上方沉积一层 SiO_2 中间层,利用化学机械抛光(CMP)和反应离子刻蚀(RIE)对上表面进行平坦化处理。再次沉积氮化硅芯层,以制备上层信号波导。最后在器件上表面沉积一层二氧化硅包覆层,并制备金属加热电极。就垂直耦合器件而言,中间 SiO_2 层的厚度直接影响波导的耦合效果,此处选择 800 nm 厚的中间层,既有效实现耦合调制又不增加器件的制造难度。器件上表面的金属加热电极通过热光效应可以实现有效的谐振调制。显微镜下的芯片如图 6 所示,器件尺寸约为 $1.2 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ 。其中白色圆点为表面金属加热电极,黑色为用于对芯片施加电压的探针。

3.2 性能表征

对所制备的芯片进行性能表征测试,首先将其置于耦合平台上,并连接耦合装置,利用光谱分析仪测试输出光谱。测试仪器主要有光源系统、耦合系

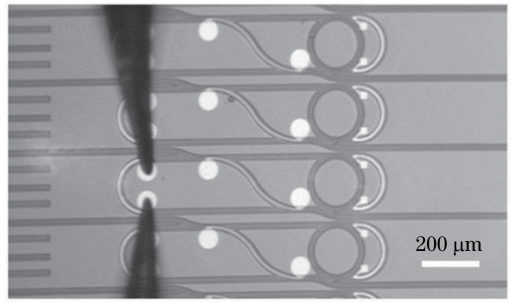


图 6 单子微环器件实物图

Fig. 6 Physical image of single sub-microring device

统、红外显微系统、光测量系统和电压控制系统。首先,将工作在 1520~1620 nm 范围的宽谱光源连接偏振控制器,并调整好偏振态,完成光源系统的准备。然后将芯片固定在芯片台上,通过包括红外相机、冷光源和显示屏的红外显微系统观察耦合情况,在高精度三维位移平台上实现光纤和芯片的高效率耦合。将得到的输出光接入光功率计和光谱分析仪进行测量分析。芯片的测试实验装置如图 7 所示,探针固定于工作台上用于测试动态输出光谱。图 7 中右上侧为耦合处的放大图,可以清楚观察到芯片的测试配置情况。

观察不同耦合系数下的透射光谱,如图 8 所示,其中波导与微腔的耦合长度用 L_{C1} 表示,微环与微腔的耦合长度用 L_{C2} 表示。 L_{C1} 分别为 0, 5, 10, 15 μm , L_{C2} 为 0(耦合长度为 0 表示耦合部分仅发生交叉耦合)。在 L_{C1} 为 0 的输出光谱中,可以观察到平整的箱型滤波,无透明谐振峰出现,1550 nm 附近得到的消光比为 3 dB。随着耦合长度 L_{C1} 的增加,观察到类 EIT 谐振峰出现,且消光比随耦合长度的增加而增大,在 5 μm 和 10 μm 的情况下得到的消光比分别为 10 dB 和 25 dB,同时测得输出光谱品质因子分别为 $Q = 2.0 \times 10^4$ 和 $Q = 1.2 \times 10^4$ 。随着耦合长度继续增加,观察到密集谐振滤波效果消失,如图 8 中 15 μm 耦合长度的输出光谱所示。15 μm 的耦合长度相当于全耦合,器件被分解成串联的两个 U 型弯曲波导耦合子微环结构,不存在干涉滤波,此时观察到 FSR 约为 2.2 nm,消光比约为 8 dB。与图 2 模拟结果相比,实验测得的输出光谱的消光比较小,这主要是由较大的波导传输损耗和制备过程中的弯曲波导对准误差引起的。除此之外,耦合得到的输出光谱谐振峰在 1550 nm 右侧附近,而模拟得到的输出光谱谐振峰在 1550 nm 左侧附近。这是由耦合区域和波导尺寸制造误差引起的,针对这个问题可以通过谐振腔上方加热电极的

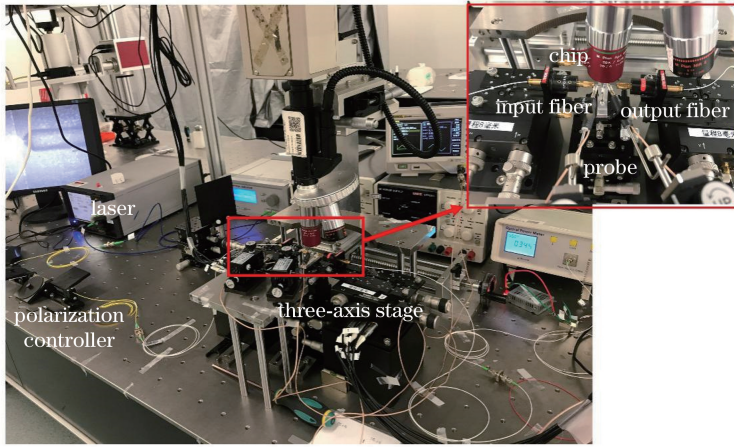


图 7 测试系统实物装置图(插图为耦合部分的放大图)

Fig. 7 Physical installation image of test system (inset is enlarged coupling part)

有效调节来解决。

通过对微腔上方的金属加热电极施加电压可以实现输出光谱的谐振调制。金属电阻产生热量,导致温度升高,从而影响波导的有效折射率,进而实现输出光谱的偏移。输出电压与谐振偏移量呈二次相关。如图 9 所示,对波导与微腔的耦合长度为 $5 \mu\text{m}$,波导与微环的耦合长度为 0 的器件分别施加 2, 4, 6, 8 V 电压,得到的输出光谱发生持续红移。其中,8 V 电压对应 0.21 nm 的波长红移。得到的输出光谱的谐振偏移调制效率不高,这主要是因为氮化硅波导的热光系数不高且上层包覆层较厚。此外,对弯曲波导上的加热电极施加电压,输出光谱几乎无任何变化,说明弯曲波导的相位改变对输出光谱无影响。

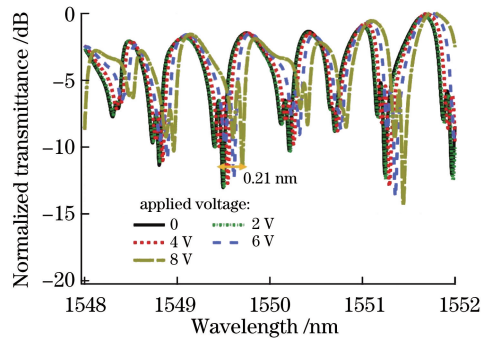


图 9 单子微环器件的输出光谱随施加电压的变化
Fig. 9 Output spectrum of single sub-microring device versus applied voltage

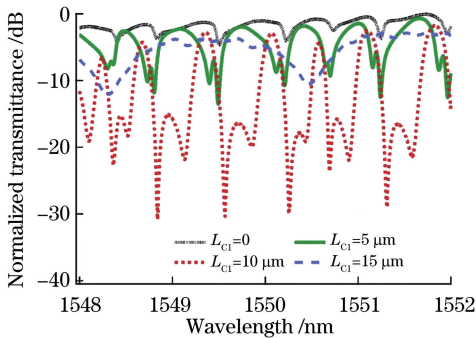


图 8 不同耦合长度下单子微环器件的输出光谱图
Fig. 8 Output spectra of single sub-microring device under different coupling lengths

4 双子微环谐振滤波系统

对上层波导增加新的子微环,可实现对称结构的双子微环谐振滤波器件,显微镜下的制备器件如图 10 所示。得到的器件尺寸与单子微环结构的尺

寸相同,具有紧凑的集成滤波效果。增加更多的子微环可实现谐振光谱的密集滤波特性。测量不同耦合长度 L_{ci} 下的输出光谱,如图 11 所示。在耦合长度为 0 的输出光谱中可以观察到平整的箱型滤波,得到的品质因子约为 2.0×10^4 。随耦合长度的增加,在谐振峰处出现新的类 EIT 分裂峰。且随耦合系数的继续增加,谐振峰消光比逐渐增大,最后形成两个新的滤波通道,如耦合长度为 $10 \mu\text{m}$ 的输出光谱所示。随着耦合长度的继续增加,可实现能量的全耦合,得到的输出光谱有一个较宽的谐振峰。耦合区域的全耦合导致光只沿一个路径传输,此时器件中不同时存在两种传输模式,干涉消失。在 1550 nm 附近观察耦合长度为 $10 \mu\text{m}$ 和 $15 \mu\text{m}$ 的器件,发现其输出光谱消光比分别为 20 dB 和 16 dB。与图 4 模拟结果相比,输出光谱有较小的振荡波纹出现,这是由输入光耦合反射引起的。得到的输出光谱的类 EIT 峰左右消光比不同,这主要是由波导制造过程中不可避免的误差引起的。

测试底层微腔上方的金属电极对输出光谱的调

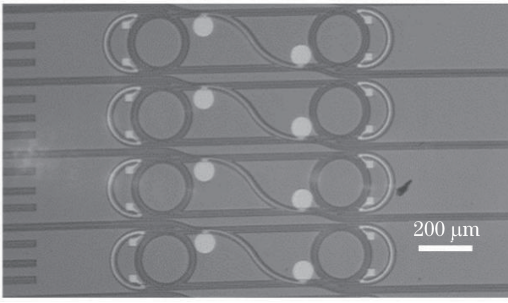


图 10 双子微环器件实物图

Fig. 10 Physical image of double sub-microring device

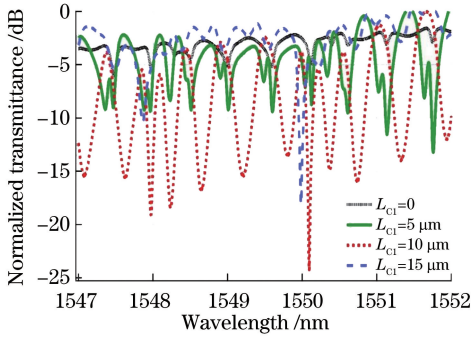


图 11 不同耦合长度下的器件输出光谱

Fig. 11 Output spectra of device under different coupling lengths

制效果,发现输出光谱具有明显的谐振波长平移,如图 12 所示。其中波导与微腔的耦合长度为 $5 \mu\text{m}$,微腔与微环的耦合长度为 0 ,随着电压的增加,谐振光谱的平移越来越明显。 8 V 电压可以引起 0.15 nm 的谐振偏移。而对弯曲反馈波导上方的加热电极施加电压,发现输出光谱无明显变化,弯曲波导上的相位变化不会引起两路相干光束光程差的变化,因此输出光谱无红移现象,实验与理论结果相符。研究微腔上方的电压与输出光谱的关系,如图 13 所示,可以观察到光谱偏移量与电压呈二次相关性。而单子微环相较于双子微环结构具有更高的调

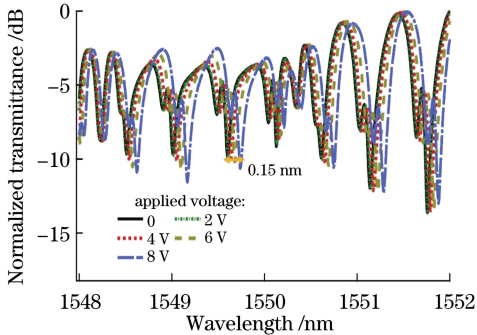


图 12 双子微环器件的输出光谱随施加电压的变化

Fig. 12 Output spectrum of double sub-microring device versus applied voltage

节效率。这主要是因为器件结构对相位变化更敏感。

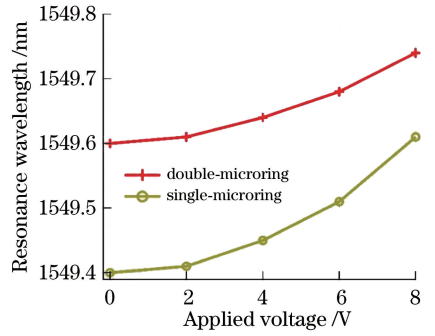


图 13 输出光谱的谐振波长随施加电压的变化

Fig. 13 Resonance wavelength of output spectrum versus applied voltage

图 14 给出了输出单子微环和双子微环结构的输出光谱对比图。其中,器件波导与微腔的耦合长度均为 $5 \mu\text{m}$,微环与微腔的耦合长度均为 0 。发现双子微环器件具有更密集的输出光谱特性,在 1550.3 nm 附近出现新的分裂峰。同时两个器件具有相同的尺寸,更多的子微环的集成有效提高了器件的集成密集度,为器件提供了更多的调节自由度。

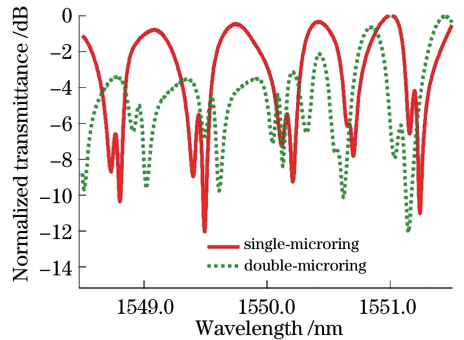


图 14 单子微环与双子微环的输出光谱对比图

Fig. 14 Output spectral comparison between double sub-microring device and single sub-microring device

5 结 论

基于底层微腔与顶层波导的三维耦合结构,提出了集成底层主微环与顶层子微环的多微环谐振滤波器。基于传输矩阵方法,通过波导与微腔耦合系数的控制来调制输出波形,实现了滤波光谱的设计。同时,可通过电压控制主微环上方的热光移相器来调制输出光谱谐振峰的位置。在多微环谐振系统中,子微环数目的增加可有效提高谐振滤波效果,增加设计自由度。所提出的多微环谐振系统具有结构紧凑和调节自由度高的优点,在光通信和光学传感等领域具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Song Y J, Zhan L, Hu S, et al. Tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with a polarization-maintaining fiber Sagnac loop filter [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(9): 2015-2017.
- [2] Song J F, Zhao H W, Fang Q, et al. Effective thermo-optical enhanced cross-ring resonator MZI interleavers on SOI [J]. Optics Express, 2008, 16(26): 21476-21482.
- [3] Chew Y H, Tjhung T T, Mendis F V C. An optical filter of adjustable finesse using an amplified fiber ring resonator [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(2): 364-370.
- [4] Choudhary A, Liu Y, Marpaung D, et al. On-chip Brillouin filtering of RF and optical signals [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(6): 7600211.
- [5] Fan S H. Sharp asymmetric line shapes in side-coupled waveguide-cavity systems [J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(6): 908-910.
- [6] Xiao G L, Liu L, Yang H Y, et al. Light transmission characteristics of metal curved waveguide based on microcavity coupling structures [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1213001.
肖功利, 刘利, 杨宏艳, 等. 基于微腔耦合结构金属弯曲波导的光透射特性 [J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1213001.
- [7] Li J, Zheng P F, Xu X M, et al. Reconfigurable microwave photonic bandpass filter based on silicon nitride microring and carrier separation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 011301.
李静, 郑鹏飞, 徐雪朦, 等. 基于氮化硅微环和载波分离的可重构微波光子带通滤波器 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 011301.
- [8] Hsieh C H, Wang R B, Wen Z J, et al. Flat-top interleavers using two Gires-Tournois etalons as phase-dispersive mirrors in a Michelson interferometer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(2): 242-244.
- [9] Luo L, Ibrahim S, Nitkowski A, et al. High bandwidth on-chip silicon photonic interleaver [J]. Optics Express, 2010, 18(22): 23079-23087.
- [10] Capmany J, Muñoz P, Sales S, et al. Arrayed waveguide Sagnac interferometer [J]. Optics Letters, 2003, 28(3): 197-199.
- [11] Naeem K, Kim B H, Kim B, et al. Simultaneous multi-parameter measurement using Sagnac loop hybrid interferometer based on a highly birefringent photonic crystal fiber with two asymmetric cores [J]. Optics Express, 2015, 23(3): 3589-3601.
- [12] Shi N N, Gu Y Y, Hu J J, et al. Study of the tunable optical comb filter based on Sagnac interferometer loop [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0306001.
石暖暖, 谷一英, 胡晶晶, 等. 基于 Sagnac 环可调谐光梳状滤波器特性研究 [J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0306001.
- [13] Zhang J, Qiao X G, Guo T, et al. Highly sensitive temperature sensor using PANDA fiber Sagnac interferometer [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(24): 3640-3644.
- [14] Cheng Z M, Zeng J, Chang C, et al. Structural impact localization based on optical fiber Sagnac sensing technique [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1006004.
程竹明, 曾捷, 常晨, 等. 基于光纤 Sagnac 传感技术的结构冲击定位 [J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1006004.
- [15] Fang X J, Claus R O. Polarization-independent all-fiber wavelength-division multiplexer based on a Sagnac interferometer [J]. Optics Letters, 1995, 20(20): 2146-2148.
- [16] Zhu X J, Geng J, Zhang G A, et al. Tunable double pulse dissipative solitons Yb-doped fiber laser based on Sagnac loop [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0414002.
朱晓军, 耿健, 章国安, 等. 基于 Sagnac 环的可调谐双脉冲耗散孤子掺 Yb 光纤激光器 [J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0414002.
- [17] Liu S, Yang Y H, Chen Y X. Phase interrogation algorithm with high resolution for hybrid Sagnac interferometers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1005006.
刘硕, 杨远洪, 陈宇轩. 混合 Sagnac 干涉仪高分辨率相位解调算法 [J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1005006.
- [18] Ma K, Zhang Y, Wu Y, et al. Tunable dual-channel filter based on an add-drop resonator Sagnac interferometer [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(11): 2400-2405.
- [19] Xu M, Yang W, Hong T, et al. Ultrafast all-optical flip-flop based on passive micro Sagnac waveguide ring with photonic crystal fiber [J]. Applied Optics, 2017, 56(16): 4577-4584.
- [20] Zhou N, Zheng S, Long Y, et al. Reconfigurable and tunable compact comb filter and (de) interleaver on silicon platform [J]. Optics Express, 2018, 26(4): 4358-4369.
- [21] Qian G, Zhang T, Zhang L J, et al. Demonstrations of centimeter-scale polymer resonator for resonant

- integrated optical gyroscope [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 237: 29-34.
- [22] Moss D J, Morandotti R, Gaeta A L, et al. New CMOS-compatible platforms based on silicon nitride and Hydrex for nonlinear optics [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(8):597-607.
- [23] Xie W Q, Zhu Y P, Aubert T, et al. Low-loss silicon nitride waveguide hybridly integrated with colloidal quantum dots[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12152-12160.
- [24] Barwicz T, Popovic M A, Rakich P T, et al. Microring-resonator-based add-drop filters in SiN: fabrication and analysis[J]. *Optics Express*, 2004, 12(7):1437-1442.
- [25] Vivien L, Marris-Morini D, Griol A, et al. Vertical multiple-slot waveguide ring resonators in silicon nitride[J]. *Optics Express*, 2008, 16(22):17237-17242.
- [26] Fei Y, He Y M, Yang F H, et al. Effect of backreflection and normal mode loss on the transmission of waveguide ring resonator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0513001.
费瑶, 何玉铭, 杨富华, 等. 端面反射和超模损耗对波导环形谐振腔输出谱线的影响 [J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0513001.
- [27] Xu X M, Zheng P F, Li J, et al. Delay test of tunable silicon nitride micro-ring based on optical vector-network analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1113001.
徐雪朦, 郑鹏飞, 李静, 等. 基于光矢量网络分析的可调氮化硅微环延时测试研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1113001.
- [28] Feng J J, Akimoto R. T-shape suspended silicon nitride ring resonator for optical sensing applications [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(15): 1601-1604.
- [29] Zhai S, Feng J J, Sun X Y, et al. Vertically integrated waveguide self-coupled resonator based tunable optical filter [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3766-3769.
- [30] Zhai S, Feng J J, Sun X Y, et al. Dual-layer cross-coupled tunable resonator system in a three-dimensional Si₃N₄ photonic integration platform [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3298-3304.
- [31] Hong J, Huang W, Makino T. On the transfer matrix method for distributed-feedback waveguide devices [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1992, 10(12): 1860-1868.
- [32] Zhou L J, Poon A W O. Electrically reconfigurable silicon microring resonator-based filter with waveguide-coupled feedback [J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9194-9204.
- [33] Zhou X T, Zhang T, Yin X, et al. Dynamically tunable electromagnetically induced transparency in graphene-based coupled micro-ring resonators [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 6600609.
- [34] Pan J, Zhai S, Feng J, et al. Double-layer cross-coupled silicon nitride multi-ring resonator systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(5): 227-230.