

马赫-曾德尔结合矩形环谐振腔的超紧凑光滤波器

王 爽¹ 刘 克^{1,2}

¹北京工业大学光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124

²George Washington University, Department of Electrical and Computer Engineering,
Washington, DC 20052, USA

摘要 基于微环构成的滤波器,因其具有较大曲率半径以及窄带宽等缺陷,提出一种马赫-曾德尔结构结合矩形环谐振腔的高效紧凑光滤波器。器件结构均由基于受抑全内反射原理的沟槽型微纳光子耦合器和基于全内反射原理的90°弯曲波导构成。采用状态空间表示法和时域有限差分法对器件的品质因数、传输特性等参数进行了计算和仿真。状态空间表示法对比了不同耦合系数及损耗系数对滤波特性的影响;利用时域有限差分法仿真得到在反射系数接近穿透系数时,呈现出的通带和阻带带宽不等的非对称波长交错滤波效果,在反射系数远大于穿透系数时,滤波器品质因子约为3120,并获得在25 μm × 8 μm面积下自由光谱范围高达50.6 nm的特性。该器件提高了在单片光子集成电路中的集成度且具备二维方向布局配置及扩展的能力。

关键词 集成光学; 光学滤波器; 时域有限差分; 矩形环谐振腔; 马赫-曾德尔干涉仪; 受抑全内反射

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0513001

Ultra-Compact Optical Filter with Rectangular Ring Resonator and Mach-Zehnder Interferometer

Wang Shuang¹ Liu Ke^{1,2}

¹Key Laboratory of Optoelectronics Technology, Ministry of Education, Beijing
University of Technology, Beijing 100124, China

²George Washington University, Department of Electrical and Computer Engineering,
Washington, DC 20052, USA

Abstract Optical filter based on microring resonator usually has drawbacks such as narrow bandwidth and larger radius of curvature. An ultra-compact optical filter consisting of rectangular ring resonator incorporated with two Mach-Zehnder interferometers is proposed and optimized, and the device is formed by trench-based nanophotonic frustrated total internal reflection couplers and total internal reflection mirror-based 90° bends waveguide. The performances such as transfer function, quality factor, and transmission characteristic are analyzed by using state-space representation and finite difference time domain (FDTD) methods. The dependence of filtering features on both different coupling coefficients and loss coefficients is calculated with state-space representation method. The FDTD simulation results show the device exhibits an asymmetric wavelength interleaver filtering effect with the different ratios of pass-band and stop-band bandwidths when the coupler reflection coefficient is close to the coupler transmission coefficient. The quality factor of about 3120 and the free spectral range up to 50.6 nm are observed in such small 25 μm × 8 μm chip area when the coupler reflection coefficient is far larger than the coupler transmission coefficient. The compact configuration of device layout is beneficial to the extension at two-

收稿日期: 2014-12-15; 收到修改稿日期: 2015-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(61377059)、北京市自然科学基金(4142004)、教育部留学回国人员科研启动基金、北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划

作者简介: 王 爽(1988—),男,硕士研究生,主要从事集成光子学器件方面的研究。E-mail: czyfws@163.com

导师简介: 刘 克(1973—),男,博士,教授,主要从事集成光子学材料与器件方面的研究。

E-mail: liuke@bjut.edu.cn(通信联系人)

dimensional directions for highly dense photonic integrated circuits.

Key words integrated optics; optical filter; finite difference time domain; rectangular ring resonator; Mach-Zehnder interferometer; frustrated total internal reflection

OCIS Codes 130.7408; 230.4555; 230.5750; 230.7408

1 引 言

移动多媒体、交互式网络电视以及视频数据流等终端信息数据的海量增长对建设宽带光纤城域网提出了更高、更快的要求,具有波长选择能力的上下话路光滤波器是城域网节点系统中的重要器件。它可以将不同波长的光信号分离或者组合,从而实现在网络节点下话路或插入本地的用户信号(即上下话路)而不影响其他信号的传输,为提高网络的灵活性和透明性提供了极大的便利^[1]。另外,上下话路光滤波器也是构成波分复用光骨干传输网络中节点设备如光分插复用器(OADM)、光交叉连接器(OXC)、波长交错器(Interleaver)等的核心器件^[2-3]。随着波分复用通信系统的信道间隔宽度从 100 GHz(0.8 nm)向更窄带宽的发展,对滤波器提出了更高分辨率、更低损耗和低成本且小型化的要求。传统的薄膜滤波器、阵列波导光栅将难以满足日益增长的高性能的需求^[4]。光纤滤波器具有极低的插入损耗,同时对偏振不敏感,可以结合光纤光栅、光纤耦合器、声光调制器等器件实现可调谐波长滤波,被广泛应用于光通信领域^[5]。但是随着微纳光子集成技术的发展,采用高密度单片集成分立光器件的方式成为实现未来高速率、大容量以及低功耗光网络的主要手段。光纤滤波器难以适应光子集成发展的大趋势,而平面光波导滤波器具有功耗小、易于集成等优点,具有广阔的应用前景。波导型滤波器件可以采用硅、磷化铟、砷化镓、二氧化硅等衬底材料,采用聚合物作为波导材料具有工艺简单、制造成本低的优点^[6-7];而采用绝缘体上硅(SOI)材料与传统 CMOS 工艺兼容,可以将器件进一步小型化,已经成为研究的热点^[8-9]。

目前大部分的光波导滤波器是采用基于单一微环谐振腔或者级联微环谐振腔结构。此类光滤波器具有插入损耗低、品质因子高和结构紧凑灵活等特点,被广泛应用于光子集成回路中^[10]。但是随着光子回路集成度的提高,微环半径下降到一定数值时,由于波导的弯曲损耗急剧增大,微环谐振能力下降,限制了谐振环的进一步减小^[11],从而影响了此器件在光子集成回路中的集成度。同时,当单微环谐振腔滤波器的洛伦兹型谱线特性难以满足应用的需求时,常采用多微环串联、并联或其他结构复杂的高阶微环滤波器得到近似矩形的箱形谱线^[12-13],该级联结构进一步限制了微环谐振腔滤波器在二维平面上的集成度。

本文提出一种由基于沟槽的微纳分光/合光器和 90°弯曲波导构成的光波导滤波器结构设计。此结构由矩形环谐振腔结合马赫-曾德尔干涉仪(MZI)构成。采用状态空间表示法,分析了沟槽型耦合器耦合系数及光损耗对滤波特性的影响。通过时域有限差分法(FDTD)进行了器件功能验证,发现在不同的耦合系数情况下滤波器呈现非对称波长交错及自由光谱范围加倍的滤波特性。采用基于受抑全内反射原理的沟槽型微纳光子耦合器代替传统的 Y 分支、定向耦合器或多模干涉耦合器,不仅突破了微环谐振腔对于直径大小的限制,对于相同宽度的波导,可以得到腔长更小的谐振环,从而增大滤波器的自由光谱区。同时由于沟槽型耦合器的特殊分光方向,在较小的平面面积内实现了谐振环与耦合波导的多次干涉,可以形成特殊滤波谱线。在设计时通过调整微纳沟槽的宽度及内部填充介质的折射率,可以得到自由光谱范围(FSR)加倍的滤波器或非对称交错滤波器。

2 器件结构与原理

2.1 器件结构

图 1(a)为沟槽型马赫-曾德尔结构结合矩形环谐振腔的滤波器示意图,以采用 SOI 材料为例。器件由一个位于中心的矩形环谐振腔外加上两个 MZI 结构结合而成,具有输入端(input)、直通端(through)、下路端(drop)和上路端(add)四个端口。其中矩形环谐振腔包含了 4 个在两条波导十字交汇处刻蚀与光波的传播方向成 45°角的微纳沟槽,此微纳沟槽构成了新型分光/合光器, L 为谐振腔宽度。分别在上下两个 MZI 结构中引入了 90°弯曲波导,即在拐角位置刻蚀与光波传播方向成 45°角的全反射切面。该切面可以在较小的区域范围内实现光场传输方向的 90°弯折。另外,器件可以理解为由 14 条等长的光波导连接而成。光信号从该

器件的 input 端口输入,满足谐振条件的波长信号将通过 drop 端口输出,而其他波长信号将通过 through 端口输出。由于对称性,谐振波长信号可以通过 add 端口输入,自 through 端口输出,实现上载到光链路中的功能。

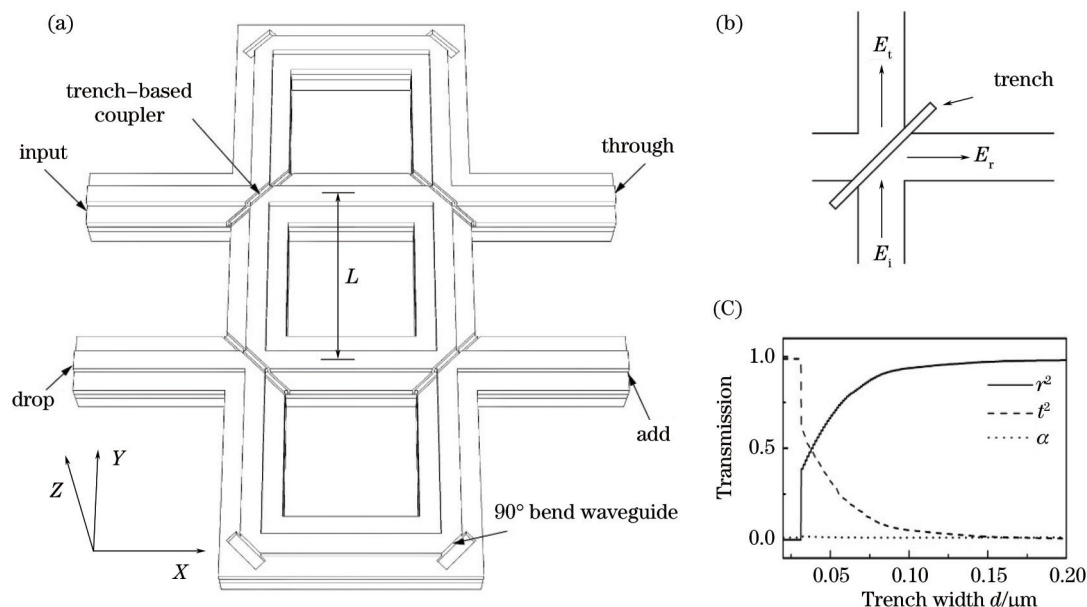


图 1 (a) 沟槽型马赫-曾德尔结构结合矩形环谐振腔滤波器结构; (b) 基于受抑全内反射原理的沟槽型分光器; (c) 采用 FDTD 模拟沟槽型分光器的分光系数、损耗与沟槽开口宽度之间的关系

Fig.1 (a) Schematic of optical filter consisting of trench-based rectangular ring resonator incorporated with two Mach-Zehnder interferometers; (b) trench-based optical coupler based on frustrated total internal reflection; (c) reflection and transmission coefficients and loss of trench-based coupler dependence on trench width by FDTD simulation

2.2 沟槽耦合器原理

微纳沟槽型分光/合光器的工作原理均是利用光波的受抑全内反射 (FTIR) 现象^[14], 即当从输入波导进入沟槽的光倏逝波与沟槽的宽度相比拟时, 一部分倏逝波穿过沟槽到达对面的介质界面而形成穿透光波; 另一部分倏逝波通过古斯-汉欣位移现象而形成反射光波。如图 1(b) 所示, 耦合区的光场分布可表示为其电场幅度分量, 其中 E_i 为输入光信号电场、 E_r 为反射电场、 E_t 为透射电场。对于任意沟槽分光器, 反射分光系数 $r = |E_r|/|E_i|$, 透射分光系数 $t = |E_t|/|E_i|$ 。反射及透射分光系数主要受沟槽开口宽度及其内部填充介质材料的折射率影响, 通常情况下沟槽宽度越宽、填充介质材料的折射率越大时, 反射系数就变得越大, 同时透射系数就越小^[15]。耦合器总的归一化光功率满足能量守恒定律,

$$r^2 + t^2 = 1 - \alpha, \quad (1)$$

式中 α 为沟槽型耦合器的光能量损耗, 理想状态下 $\alpha = 0$, 而在实际应用中由于波导损耗等原因, α 值的大小会对器件性能具有一定的影响。此外, 沟槽位置偏移、宽度误差和角度偏差等工艺制备因素都会使耦合系数发生变化^[16]。图 1(c) 展示了利用 FDTD 模拟不同沟槽开口宽度对沟槽型分光器的反射和透射分光系数以及耦合器损耗的影响, 采用了波导宽度为 $1.6 \mu\text{m}$, 内脊高 $0.76 \mu\text{m}$, 外脊高 $0.66 \mu\text{m}$ 的 SOI 脊波导。器件设计过程中, 通过设置不同沟槽开口宽度调节分光系数, 从而有选择性的设计该滤波器的工作模式。

3 信号分析法

状态空间表示是信号层面的分析法, 利用状态变量描述系统的内部特性, 并未考虑光波在沟槽型微纳分光/合光器中的物理传播过程, 适用于多输入-输出系统。当对器件构造状态空间时, 可将器件看作一个离散时域信号系统, 将具有一定长度且有相同结构的光波导作为延时单元, 在 Z 域表示为 Z^{-1} 项^[17]。其物理意义为光信号通过该长度波导的延时, 即 nd/c , 其中 n 表示波导的等效折射率, d 表示波导长度, c 表示真空中的光速。以该延时单元作为基本动态元件, 如图 2(a) 所示, 将每个延时单元的输出作为状态变量 $X_1(k) \sim X_{13}(k)$, 从而构成完整描述系统内部特性的状态空间。

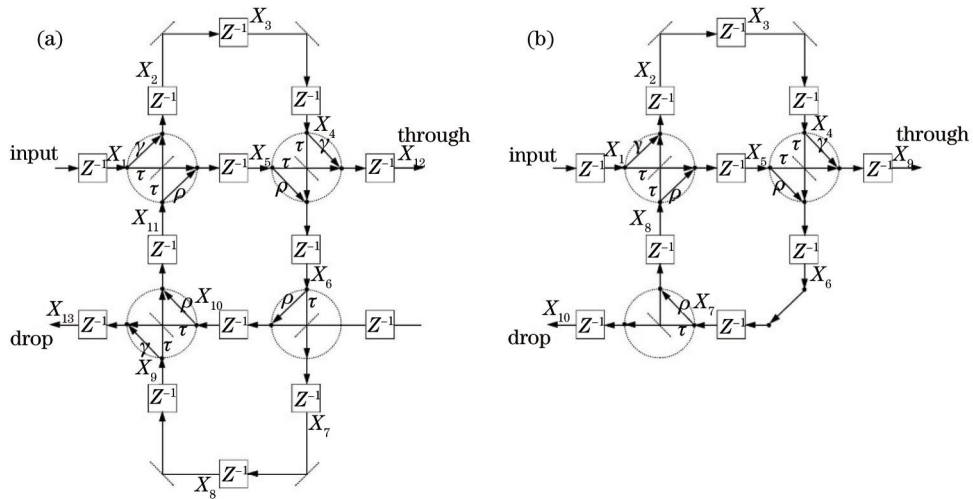


图2 沟槽型(a)双马赫-曾德尔结构和(b)单马赫-曾德尔结构结合矩形环谐振腔滤波器器件的状态空间表示信号流程图

Fig.2 Signal flow diagrams of optical filters consisting of trench-based rectangular ring resonator incorporated with (a) double MZI structures and (b) single MZI structure by using state space representation method

对于沟槽型耦合器,光信号的电场矢量在一维方向上具有相反的相位,即向左反射和向右反射,透射和回波反射。因此引入矢量穿透系数 τ , 则 $|\tau|=t$ 。同时引入向左矢量反射系数 ρ 和向右矢量反射系数 γ , 则 $\rho=-\gamma, |\alpha|=|\gamma|=r$ 。图2为4个虚线圆框内的信号方向指向,分别描述了每个矢量信号在通过沟槽耦合器时的情况。

对于状态变量,例如对于矩形环谐振腔结合双马赫-曾德尔结构,可以列出一阶差分方程如下:

$$\begin{cases} X_1(k+1) = u(k), \\ X_2(k+1) = \gamma X_1(k) + \tau X_{11}(k), \\ X_3(k+1) = X_2(k), \\ X_4(k+1) = X_3(k), \\ X_5(k+1) = \tau X_1(k) + \rho X_{11}(k), \\ X_6(k+1) = \tau X_4(k) + \rho X_5(k), \\ X_7(k+1) = \tau X_6(k), \\ X_8(k+1) = X_7(k), \\ X_9(k+1) = X_8(k), \\ X_{10}(k+1) = \rho X_6(k), \\ X_{11}(k+1) = \tau X_9(k) + \rho X_{10}(k), \\ X_{12}(k+1) = \gamma X_4(k) + \tau X_5(k), \\ X_{13}(k+1) = \gamma X_9(k) + \tau X_{10}(k), \end{cases} \quad (2)$$

式中 $u(k)$ 表示输入状态,through 端口和 drop 端口输出方程分别表示为

$$\begin{cases} y_1(k) = X_{12}(k), \\ y_2(k) = X_{13}(k), \end{cases} \quad (3)$$

采用传输矩阵法通常表示为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k), \quad (4)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k), \quad (5)$$

式中 $\mathbf{x}(k+1)$ 、 $\mathbf{x}(k)$ 、 $\mathbf{y}(k)$ 分别为 13 阶向量。 \mathbf{A} 为 13×13 阶矩阵,表征状态变量之间的关系; \mathbf{B} 、 \mathbf{D} 为 13×1 阶矩阵,分别表征输入变量对状态变量和输出变量的影响; \mathbf{C} 为 1×13 阶矩阵,表征状态变量与输出变量间的关系:

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \tau & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tau & \rho & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau & \rho & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma & \tau & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma & \tau & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\
 B &= [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \\
 C &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0], \\
 D &= [0].
 \end{aligned} \tag{5}$$

滤波器的传输函数可表示为

$$H(z) = \frac{\mathbf{y}(k)}{\mathbf{u}(k)} = \mathbf{C}(z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}. \tag{6}$$

代入对应的系数矩阵,分别得到矩形环谐振腔结合双马赫-曾德尔结构滤波器的 through 端口和 drop 端口的传递函数为

$$\begin{aligned}
 H_{\text{thro}}(z) &= \frac{-t^2 z^{-3} - r^2 z^{-5} + (r^6 + 2r^4 t^2 + r^2 t^4)z^{-9} + (r^4 t^2 + 2r^2 t^4 + t^6)z^{-11}}{-1 + r^4 z^{-4} + 2r^2 t^2 z^{-6} + t^4 z^{-8}}, \\
 H_{\text{drop}}(z) &= \frac{-r^2 t^2 z^{-5} + 2r^2 t^2 z^{-7} - r^2 t^2 z^{-9}}{-1 + r^4 z^{-4} + 2r^2 t^2 z^{-6} + t^4 z^{-8}}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

传递函数反应了输出/输入端口间的频率响应关系,体现器件的滤波特性。目前对于微环谐振腔结合非对称马赫-曾德尔结构的器件已被广泛的研究,该结构由于其特殊的滤波特性,大多应用在滤波器、调制器等光器件中^[18-20]。这种典型的微环谐振腔采用定向耦合器,结合U形波导与微环的一部分耦合构成非对称马赫-曾德尔结构。而矩形环谐振器由于沟槽型耦合器特殊的光分方向,结合全反射切面构成的90°弯曲波导可以形成上下两个马赫-曾德尔结构。与单马赫-曾德尔器件相比[见图2(b)],具有新的滤波特性。图3为对比矩形环谐振腔结合双/单马赫-曾德尔结构的 through 端口幅频响应曲线,可见双马赫-曾德尔结构结合环形谐振腔产生了新的滤波特性,并且性能优于单马赫-曾德尔结构结合环形谐振腔的情况。

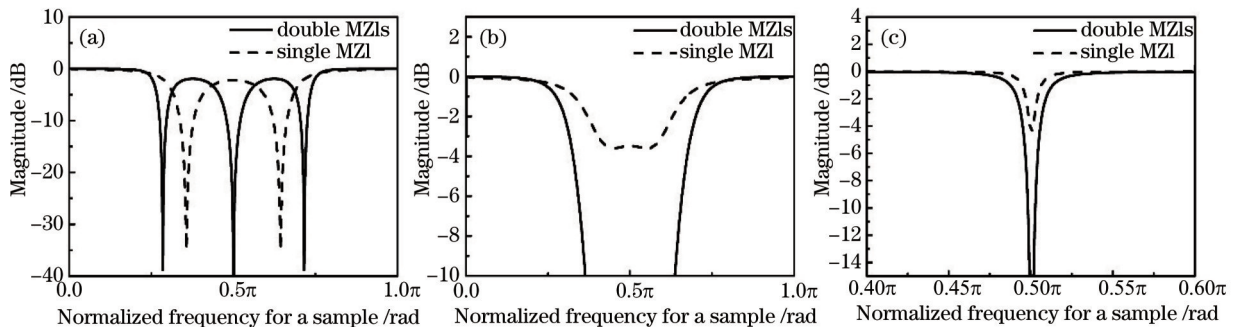


图3 矩形环谐振腔分别结合双马赫-曾德尔结构和单马赫-曾德尔结构的系统频率响应曲线。(a) $r=0.55, t=0.84$; (b) $r=0.8, t=0.6$; (c) $r=0.99, t=0.14$

Fig.3 Frequency responses of rectangular ring resonator incorporated with double MZIs and single MZI at the various coupler reflection coefficients and transmission coefficients. (a) $r=0.55, t=0.84$; (b) $r=0.8, t=0.6$; (c) $r=0.99, t=0.14$

当反射耦合系数 r 较小时,与单马赫-曾德尔结构相比,矩形环谐振腔结合双马赫-曾德尔的结构在一个周期内,through 端口的下降峰由两个增加到三个,形成密集的梳状滤波曲线[见图3(a)]。当 r 与 t 相当时,滤

波器呈通带与阻带交替的滤波特性。由于多引入一个马赫-曾德尔结构,上下两个非对称的马赫-曾德尔结构互补叠加,比单个马赫-曾德尔结构的阻带深度更大,同时过渡带更加陡直[见图3(b)]。而当 r 远大于 t 时,双马赫-曾德尔结构滤波器产生 Q 值更大的单个下降峰[见图3(c)]。总体而言,多引入一个马赫-曾德尔结构不仅使得滤波器成为对称结构,增加了一个上路端口,同时增加了环形谐振腔聚集谐振光的能力,增大了器件的消光比特性。

传递函数主要受到 r 值和 t 值,即沟槽耦合系数的影响。图4为在沟槽耦合器零损耗的理想状态下优化的系统频率响应曲线,即 $\alpha=0$ 的情况下,频率响应曲线随反射系数 r 值和透射系数 t 值的变化趋势。如图4(a)所示,当 r 较小时,频响曲线中心区呈密集的梳状分布。当 r 与 t 相当时[见图4(b)],梳状间峰值收拢,整个器件表现为通带平坦的特性,呈现出带间边沿陡峭的非对称交错滤波谱线。当 r 较大时[见图4(c)],阻带向中心收拢,形成通带平坦下降,峰峰值尖锐的洛伦兹型谱线。器件的滤波特性主要由沟槽耦合器的设计参数决定,即通过选择沟槽开口宽度、在十字交叉波导区域中的位置以及沟槽内填充的介质材料,决定滤波器的工作模式。同时在器件制备完成后,可以通过对沟槽填充具有电光效应的介质材料,调节沟槽的耦合系数,控制滤波器的响应波形。

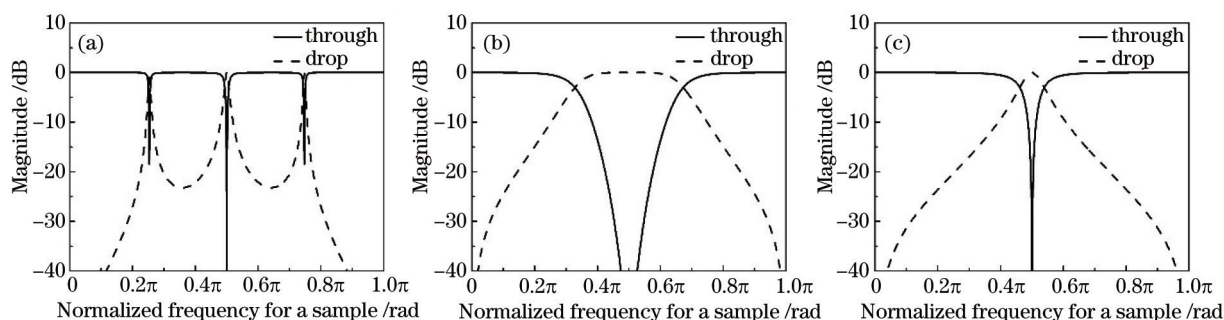


图4 光能量零损耗($\alpha=0$)情况下优化的系统频率响应曲线。(a) $r=0.2, t=0.98$; (b) $r=0.82, t=0.572$; (c) $r=0.95, t=0.312$
Fig.4 Frequency responses of the optical filter without optical loss ($\alpha=0$) at the various coupler reflection coefficients and transmission coefficients. (a) $r=0.2, t=0.98$; (b) $r=0.82, t=0.572$; (c) $r=0.95, t=0.312$

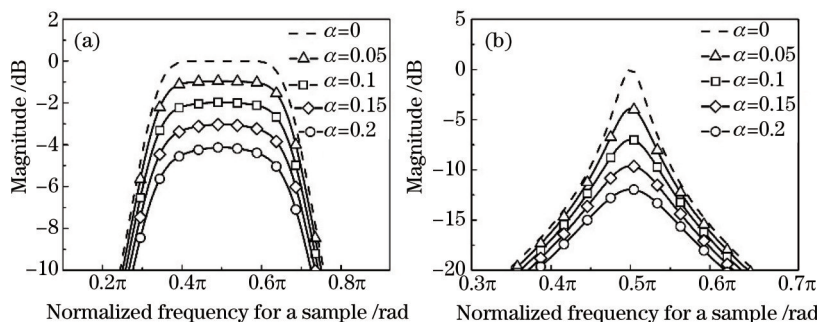


图5 不同损耗系数 α 对系统频率响应曲线的影响。(a) 反射光功率占总功率的64%; (b) 反射光功率占总功率的95%
Fig.5 Frequency responses of the optical filter at different coupler loss coefficients. (a) Proportion of reflected optical power relative to the total power is 64%; (b) proportion of reflected optical power relative to the total power is 95%

制备工艺的限制及容差,沟槽侧壁表面的平滑度、陡直度以及沟槽的位置偏差都将导致耦合光功率产生损耗。图5为drop端口在分光功率比一定时,光耦合损耗对滤波器波形的影响。如图5(a)所示,反射光功率占总功率的64%,即 $r^2/(1-\alpha)=0.64$ 时, α 值增加使输出功率减小、过渡带的陡峭度降低。当反射光功率占总功率的95%,即 $r^2/(1-\alpha)=0.95$ 时, α 值增加使峰值减小,半峰全宽增大,导致滤波器品质因子降低[见图5(b)]。这表明随着沟槽的损耗增加,中心矩形谐振环的聚集能量的特性将退化。

4 时域有限差分法仿真及分析

4.1 非对称交错滤波

FDTD能够较为精确地模拟微纳器件结构,是目前仿真光子集成器件应用较多的方法之一。由于器件

设计在 z 方向上结构简单[见图 1(a)],因此计算了波导结构在 z 方向上的有效折射率,并对映射到二维平面上的器件结构进行仿真。这种方法既能保证仿真结果在空间上的精确度,又能极大地提高仿真速度。

器件建模输入如图 1(a)所示的器件结构,其中 4 个端口所在的两条平行波导中心线的间距为 L ,也是状态空间表示法中延时单元等效波导长度。光波导采用 SOI 脊波导结构,波导下包层 SiO_2 厚度 $1 \mu\text{m}$,上包层为空气。波导芯层为 Si,内脊高 $0.76 \mu\text{m}$,外脊高 $0.66 \mu\text{m}$,脊宽 $1.6 \mu\text{m}$ 。此时沟槽内填充介质为空气。采用时域脉冲光源,通过傅里叶变换得到输出端口频域响应情况。设定光源为 TE 偏振模式光源,光谱带宽范围设定为 $1.5\sim 1.6 \mu\text{m}$ 。

沟槽宽度设定为 45 nm 时,沟槽反射分光系数 $r=0.8$ [见图 1(c)]。仿真结果显示滤波器谱线呈现通带与阻带等比例交错的特性[见图 6(a)和(b)]。谐振环的宽度越大,在特定的波长范围内其滤波曲线越密集[见图 6(a)]。当 $L=7 \mu\text{m}$ 时传输曲线具有光学波长交错器的特性,且下降峰最小值达 -16 dB [见图 6(b)],完全满足光通信系统对器件的要求。图 6(c)和 5(d)分别为图 6(b)中标注 $\lambda_{m1}=1533 \text{ nm}$ 时 drop 端口输出和 $\lambda_{m2}=1555 \text{ nm}$ 时 through 端口输出时器件内光功率分布情况,此时可以将器件视为上下两个 MZI 级联的非对称波长交错滤波器。根据实际功能分类,不同的交错带宽可以构成奇偶交错滤波器、波带交错滤波器等。级联 MZI 非对称交错滤波器,能有效地提高具有相同信道宽度、不同传输速率系统的带宽利用率^[21-22]。目前大部分采用 Y 分支、定向耦合器或多模干涉耦合器的 MZI 在一维方向上尺寸较大,片上级联 MZI 将极大占据芯片的面积,且额外增加耦合波导长度,增加了光子集成回路的设计难度。而采用沟槽型矩形级联的方式则使器件结构高效紧凑,极大地减小了片上单一器件所占的面积,从而使器件具备从传统一维方向的堆积集成转向器件布局可以在二维方向上扩展的能力。

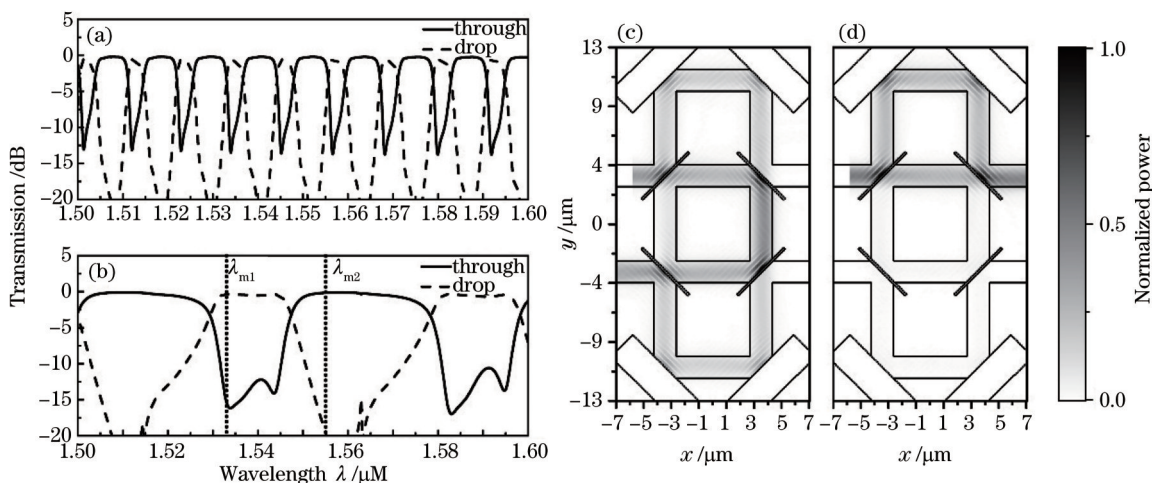


图 6 沟槽宽度 45 nm ,不同谐振腔宽度 L 情况下的传输曲线图以及相应的光功率分布图。(a) $L=30 \mu\text{m}$ 和(b) $L=7 \mu\text{m}$ 条件下, FDTD 仿真 through 端口和 drop 端口的归一化传输曲线图; $L=7 \mu\text{m}$ 条件下(c) drop 端口输出波长 $\lambda_{m1}=1533 \text{ nm}$ 和 (d) through 端口输出波长 $\lambda_{m2}=1555 \text{ nm}$ 器件光功率分布图

Fig.6 Normalized transmission responses of the optical filter with trench width of 45 nm at the different resonator widths L for (a) $L=30 \mu\text{m}$ and (b) $L=7 \mu\text{m}$; optical power distribution profiles for $L=7 \mu\text{m}$ device at the resonance wavelength output of (c) $\lambda_{m1}=1533 \text{ nm}$ from the drop port and (d) $\lambda_{m2}=1555 \text{ nm}$ from the through port

4.2 宽自由光谱范围滤波

对于高分辨率的滤波器而言,增大滤波器的自由光谱范围,可以容纳更多的信道,这对波分复用光通信系统具有重要意义^[23]。如图 7(a)所示,在 $L=7 \text{ m}$ 条件下,片占面积约为 $25 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ 。当沟槽开口宽度为 160 nm 时,沟槽反射分光系数 $r=0.98$,即反射分光系数较大时,滤波器呈现自由光谱范围高达 50.6 nm 的洛伦兹波形谱线,此时品质因子 Q 值达到 3120 [见图 7(a)]。

考虑到器件特殊结构,在矩形谐振环上方的倒 U 型波导与此谐振环在两处沟槽耦合器发生干涉。这将导致周期性交错增强和部分波长谐振抑制,从而使自由光谱范围加倍。采用 U 型波导耦合单微环结构也得到了类似的结果^[24]。图 7(b)为图 1(a)增强谐振波长 $\lambda_{m1}=1537 \text{ nm}$ 处器件内的光功率分布,可见光功率主要集

中在中心谐振环内部,两次干涉加强了内部的谐振强度。图 7(c)为受抑谐振波长 $\lambda_{n_2} = 1562 \text{ nm}$ 处的光功率分布,可以看出光路经过第二个沟槽耦合器(即靠近 through 端的耦合器)时,干涉抑制了谐振腔内的光强度,drop 端口峰值下降至 -27.9 dB ,光主要从 through 端口输出。由此间隔性地增强和抑制谐振,致使自由光谱范围增加至原来的两倍。

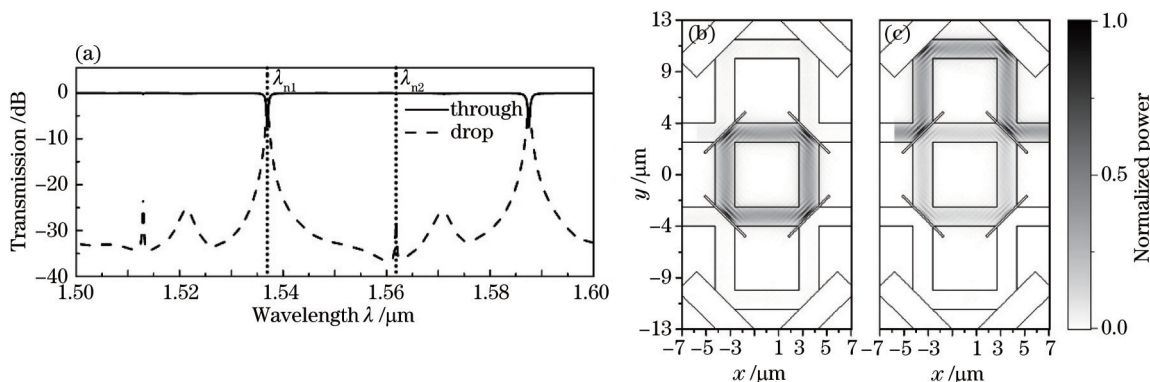


图 7 沟槽宽度为 160 nm , $L = 7 \mu\text{m}$ 条件下, (a) FDTD 仿真 through 端口和 drop 端口归一化传输曲线图; (b) 增强谐振波长 $\lambda_{n_1} = 1537 \text{ nm}$ 和 (c) 受抑谐振波长 $\lambda_{n_2} = 1562 \text{ nm}$ 时的器件光功率分布图

Fig.7 When trench width of optical filter is 160 nm at $L = 7 \mu\text{m}$, (a) normalized transmission response of drop port and through port; optical power distribution profiles (b) at the enhanced resonance wavelength of $\lambda_{n_1} = 1537 \text{ nm}$ and (c) at the inhibited resonance wavelength of $\lambda_{n_2} = 1562 \text{ nm}$

对比状态空间表示分析法的计算结果,发现当沟槽耦合器反射分光系数较大时,FDTD 仿真结果与状态空间分析结果符合较好,而在反射系数较小时,波形随沟槽宽度改变的变化幅度较大。通过对沟槽型耦合器工作原理的分析得知,由于光波通过沟槽时在靠近入射光的侧壁处存在古斯-汉森位移现象^[25],导致在对面的侧壁处出射的光波与入射光波有微小的错位,经过多个沟槽耦合器后将累加错位值并使设计的光路偏离谐振腔波导的中线,导致谐振腔长发生改变,从而造成光波在经过耦合器时产生较大的损耗。同时,沟槽耦合器的入射光角度对分光系数也有较大的影响,偏离中心线的光路会导致在不同沟槽耦合器处分光系数不完全相同。因此 FDTD 仿真结果的传输谱线在反射系数较小、光谱范围较大等情况下,与理想状态空间分析法的计算结果一致性较差,尽管 FDTD 仿真结果更能反映实际物理现象,而状态空间分析法描述的是器件的理想状态,但是其在器件的设计初期对于快速地评估器件的频率响应也具有一定的指导意义。

5 结 论

针对目前基于微环谐振腔构成的滤波器具有较大曲率半径以及窄带宽等缺陷,提出一种高效紧凑的马赫-曾德尔结构结合矩形环谐振腔的光滤波器。器件结构由基于受抑全内反射原理的沟槽型微纳分光/合光器和 90° 弯曲波导两者构成。通过状态空间表示分析法,得到该器件 through 端口和 drop 端口的传递函数,分析了在不同的耦合系数下滤波器频率响应曲线,以及沟槽耦合器损耗对滤波特性的影响。采用 FDTD 仿真进一步验证了滤波器的实际性能。当沟槽填充介质材料为空气且耦合器的反射与透射光功率相当时,器件呈现通带和阻带平滑、过度带陡峭的非对称交错滤波谱线的特性,直通端隔离度大于 20 dB ,下路端隔离度大于 13 dB ,以及直通端与下路端 3 dB 带宽不等的性能,可提高采用不同传输速率信道系统的带宽利用率。在反射光功率大于透射光功率时,呈现峰值尖锐、半峰全宽较窄的洛伦兹谱线,品质因子达 3120 ,下路端消光比为 33.5 dB ,在 $25 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ 片占面积条件下自由光谱范围高达 50.6 nm 。该滤波器不仅突破了传统微环谐振腔曲率半径的限制,而且平面面积可以设计得很小且具有较强的二维拓扑能力,能够更好地满足高密度集成片上光互联系统的要求。利用沟槽型耦合器以及 90° 弯曲波导设计的器件可以使光场传输方向在小区域范围内发生较大的改变。相比于微环型滤波器,该设计更适用于在较小的片占区域内实现多次干涉,使器件从传统一维方向的堆积集成转向具备在二维方向布局配置及扩展的能力。

- 1 Dong Xiaowei, Feng Suchun, Lu Shaohua, *et al.*. Add-drop channel filter based on two parallel long-period grating coupler[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(12): 7039–7045.
董小伟, 冯素春, 鲁韶华, 等. 两平行长周期光栅耦合器型上下话路滤波器的研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(12): 7039–7045.
- 2 Zhang Juan, Yang Xiaowei, Yu Shuai. Design of asymmetrical optical interleavers with arbitrary duty cycles based on Michelson Gires-Tournois interferometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(1): 155–161.
张 娟, 杨小伟, 于 帅. 任意占空比不等带宽迈克耳孙 Gires-Tournois 干涉型光交错复用器的设计方法[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 155–161.
- 3 Liu Jing, Sun Junqiang, Huang Chongqing, *et al.*. Study of dense wavelength division multiplexing based on graded-index photonic quantum well structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(12): 2350–2354.
刘 靖, 孙军强, 黄重庆, 等. 基于渐变折射率光量子阱的密集波分复用研究[J]. *光子学报*, 2007, 36(12): 2350–2354.
- 4 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Jia Kemiao, *et al.*. 2D-AWG based optical multiplexers/demultiplexers [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(9): 1031–1034.
杨建义, 江晓清, 贾科淼, 等. 基于二维分布阵列波导光栅的光波分复用器/解复用器[J]. *光电子·激光*, 2004, 15(9): 1031–1034.
- 5 Liu Zhuolin, Zhang Weigang, Jiang Meng, *et al.*. Configuration and development of fiber optical filter[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(3): 540–546.
刘卓琳, 张伟刚, 姜 萌, 等. 光纤滤波器的原理、结构设计及其进展[J]. *中国激光*, 2009, 36(3): 540–546.
- 6 Zheng Chuantao, Luo Qianqian, Huang Xiaoliang, *et al.*. Analysis and simulation of an ultra-compact polymer five-port optical router[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0313001.
郑传涛, 罗倩倩, 黄小亮, 等. 超紧凑聚合物五端口光路由器的分析模拟[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0313001.
- 7 Yun Bin Feng, Hu Guohua, Cui Yiping, *et al.*. Polymer micro-ring resonator filter with high quality factor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1013002.
恽斌峰, 胡国华, 崔一平. 高品质因子聚合物波导微环谐振腔滤波器[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1013002.
- 8 Hong Jianxun, Liu Ying, Chen Wei. Researches on the silicon slot microring resonator and its tunable properties[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(9): 1668–1672.
洪建勋, 刘 莹, 陈 伟. 硅基槽型微环谐振器及其可调谐特性研究[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(9): 1668–1672.
- 9 Li Shuai, Wu Yuanda, Yin Xiaojie, *et al.*. Tunable filters based on SOI microring-resonator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(8): 1143–1148.
李 帅, 吴远大, 尹小杰, 等. 基于绝缘硅的微环谐振可调谐滤波器[J]. *光子学报*, 2011, 40(8): 1143–1148.
- 10 Zhang Bin, Zhang Shumei. Design method of optical filter based on semiconductor micro-ring resonator[J]. *Novel Semiconductor Device*, 2012, 37(1): 24–28.
张 彬, 张淑梅. 基于半导体微环谐振器的光滤波器设计方法[J]. *半导体技术*, 2012, 37(1): 24–28.
- 11 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua, *et al.*. Characteristics and limitations of optical filters employing single-ring microresonators[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(1): 12–16.
杨建义, 江晓清, 王明华, 等. 采用单环微谐振器的光滤波器特性及其局限性[J]. *光电子·激光*, 2003, 14(1): 12–16.
- 12 Liu Wenkai, Zhao Ranyue, Dong Xiaowei. Design of series-coupled Chebyshev microring filters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(3): 38–42.
刘文楷, 赵冉月, 董小伟. 串联耦合切比雪夫微环滤波器的设计[J]. *光子学报*, 2014, 43(3): 38–42.
- 13 B E Little, S T Chu, P P Absil, *et al.*. Very high-order microring resonator filters for WDM applications[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(10): 2263–2265.
- 14 D L Macfarlane, M P Christensen, K Liu, *et al.*. Four-port nanophotonic frustrated total internal reflection coupler[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(1): 58–60.
- 15 Liu Ke, Mu Sixuan, Huang hui, *et al.*. Design and simulation of silicon-based rectangular Mach-Zehnder 2×2 thermo-optical switch [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(2): 14–19.
刘 克, 牟思璇, 黄 晖, 等. 硅基矩形结构马赫-曾德 2×2 热光开关的设计与仿真[J]. *光子学报*, 2014, 43(2): 14–19.
- 16 K Liu, H Huang, S Mu, *et al.*. Ultra-compact three-port trench-based photonic couplers in ion-exchanged glass waveguides[J]. *Opt Commun*, 2013, 309: 307–312.
- 17 A E Nagdi, K Liu, T P LaFave Jr, *et al.*. Active integrated filters for RF-photonic channelizers[J]. *Sensors*, 2011, 11(12): 1297–1320.

- 18 J Hong, Y Enami. Modeling and analysis of microring resonator modulators with feedback waveguide coupling[J]. J Lightwave Technol, 2011, 29(21): 3243–3249.
- 19 L Zhou, A W Poon. Electrically reconfigurable silicon microring resonator-based filter with waveguide-coupled feedback[J]. Opt Express, 2007, 15(15): 9194–9204.
- 20 X Zhang, T Zhang, X Xue, *et al.*. Tunable optical ring resonator integrated with asymmetric Mach-Zehnder interferometer[J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(17): 2512–2520.
- 21 Li Jinxing, Chen Kaixin, Zheng Yanlin. A novel asymmetric interleaver with arbitrary bandwidth ratio based on planar optical waveguide[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1105005.
李金星, 陈开鑫, 郑燕琳. 基于平板光波导任意带宽比的新型非对称交错滤波器[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1105005.
- 22 Lu Huaiwei, Zhang Baoge, Wu Kaijun, *et al.*. Design of all-fiber interleaver with unequal passband based on cascaded Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2406–2411.
鲁怀伟, 章宝歌, 邬开俊, 等. 级联马赫-曾德尔干涉仪型不等带宽交错滤波器的设计[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2406–2411.
- 23 J Feng, Q Li, Z Zhou. Single ring interferometer configuration with doubled free-spectral range[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2011, 23(2): 79–81.
- 24 Li Zhiqun, Li Xiaoyun, Sun Yuchao, *et al.*. Doubled free spectral range of single micro-ring resonator filter[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0723001.
李志全, 李晓云, 孙宇超, 等. 自由光谱范围加倍的单微环谐振滤波器[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0723001.
- 25 Y Qian. Compact Trench Based Bend and Splitter Devices for Silicon-on Insulator Rib Waveguides[D]. Utah: Brigham Young University, 2009.

栏目编辑: 王晓琰