

doi:10.3788/gzxb20154412.1213003

基于耦合调制矩形环谐振腔高速电光调制器

王爽¹, 刘克^{1,2}, 张成龙¹

(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)

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

摘 要:针对基于腔内折射率调制效应的微环电光调制器高 Q 值和调制带宽相互制约的问题,提出一种基于耦合调制方式的矩形环谐振腔电光调制器.器件由基于受抑全内反射原理的沟槽型光耦合器和基于全反射原理的 90° 弯曲波导构成.通过建立时域动态模型对器件进行仿真设计,可得其调制相位小于 0.2π 、静态调制深度大于 0.96 (归一化最大值为 1.0)、调制带宽大于 100 GHz.该器件片占面积为 $10\mu\text{m}\times 15\mu\text{m}$,高效紧凑,满足高度集成、低能耗和高速调制等要求,可向二维方向配置和扩展.该器件可应用于单片光子集成电路.

关键词:集成光学;电光调制器;动态时域模型;时域有限差分;矩形环谐振腔;受抑全内反射

中图分类号:TN256

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)12-1213003-7

Ultra-Compact Coupling Modulation Based High Speed Electro-optic Modulator with Rectangular Ring Resonator

WANG Shuang¹, LIU Ke^{1,2}, ZHANG Cheng-long¹

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

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

Abstract: In order to solve the mutual restricted problem between modulation bandwidth and high Q value of microring electro-optic modulator which used intracavity index modulation mechanism in the device, an ultra-compact coupling modulation based electro-optic modulator was proposed. This device consists of trench-based frustrated total internal reflection couplers and 90° waveguide bends. A time domain dynamic model was used to evaluate the device performance, and the results show that the modulation phase change is less than 0.2π , the state modulation depth is greater than 0.96 (normalized maximum of 1.0), and the modulation bandwidth is greater than 100 GHz. This high speed modulator exhibits a small chip area of $10\mu\text{m}\times 15\mu\text{m}$ and a lower power consumption. The compact device configuration shown here is beneficial to the extension at two-dimensional directions, and may be potentially utilized in large-scale photonic integrated circuits.

Key words: Integrated photonics; Electro-optic modulator; Time domain dynamic model; Finite difference time domain; Rectangular ring resonator; Frustrated total internal reflection

OCIS Codes: 130.4110; 230.4110; 230.4555; 230.5750

基金项目:国家自然科学基金(No. 61377059)、北京市自然科学基金(No. 4142004)、教育部留学回国人员科研启动基金和北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目资助

第一作者:王爽(1988—),男,硕士研究生,主要研究方向为集成光子学器件. Email:czyfws@163.com

导师(通讯作者):刘克(1973—),男,教授,博士,主要研究方向为集成光子学材料与器件. Email:liuke@bjut.edu.cn

收稿日期:2015-07-01; **录用日期:**2015-08-19

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

随着光互连逐步取代以电子作为信息载体的互连技术,光器件正朝着高集成度、低能耗的方向发展^[1]. 硅基波导型光调制器与传统的热光、声光调制器相比,具有较小的插入损耗,同时由于具备 CMOS 工艺兼容特性,更利于片上集成,已成为研究热点. 波导型电光调制器按光学结构主要分为马赫-曾德干涉型和微环谐振型^[2-3]. 马赫-曾德干涉型是最为常见的光强度调制结构之一,结构简单、易于集成,但是其调制特性曲线为正弦型曲线,线性区域较小,导致调制深度受到较大的限制^[4]. 因此常采用前馈补偿或电路预补偿等电学方案进行相位补偿,或采用微环辅助方式对其进行光学线性补偿^[5-6]. 这些方式增加了器件的制备复杂度,同时使器件尺寸增大,限制了集成度.

波导型微环光学调制器通常由封闭的微型圆环耦合一个输入和输出的光波导构成. 微环腔内调制法 (Intracavity index modulation) 通过微环腔对特定波长光的谐振特性,改变腔内材料的折射率,即控制微环内光相位的变化,使谐振峰值发生漂移,从而达到调制输出光的目的. 由于其调制特性曲线线性区域十分陡峭,特别对于高 Q 值的微环可以通过极小折射率变化控制输出光强度,调制所需的驱动电压较小,因此调制单位比特所需的能量也较小. 由于高 Q 值的微环对光具有很强的谐振能力,导致腔内光子寿命很长,限制了光场幅度在腔内往返周期内的上升和下降时间. 因此在高频区域调制带宽显著下降,即呈现高 Q 值微环调制器和调制带宽相互制约的矛盾^[7]. 为缓解这个制约关系,近年来有研究者提出微环的耦合调制 (Coupling modulation) 模式^[8-11],即腔内各参量如相位等保持恒

定,但是微环与直条波导的耦合相位被调制. 通过一条额外的回馈相移臂 (Feedback arm) 与微环进行两次耦合,同时与微环的一部分组合成一个非对称的马赫-曾德干涉仪结构. 对谐振频率的光,相移臂在没有外加电压时设置为 π 相移,此时光从相移臂直接输出而不进入微环,相当于调制器的 ON 状态. 当施加外加电压引起极小的相移时,光耦合进入微环而没有输出光,相当于调制器的 OFF 状态. 这种调制方式突破了传统微环调制腔内长的光子寿命对带宽的限制^[12],使调制速率上限接近微环的自由频谱范围 (Free Spectral Range, FSR).

为进一步减小基于耦合调制的微环调制器的尺寸和功耗,本文提出一种由沟槽型光耦合器和 90° 弯曲波导构成的新型电光调制器结构. 采用时域有限差分法 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 验证了基于受抑全内反射原理的沟槽型光耦合器的分光效应,并基于耦合模理论建立动态的时域模型,对该器件的调制特性曲线以及调制深度等性能参量进行模拟. 采用 FDTD 仿真方法,进一步验证器件的功能特性.

1 器件结构与原理

1.1 器件结构

器件由上方的非对称马赫-曾德干涉仪和下方的矩形环谐振腔构成,如图 1(a),两者共用一段直条波导. 波导交叉交叉处刻蚀与光传播方向呈 45° 角的窄开口微纳沟槽,作为分光/合光耦合器;波导拐角位置刻蚀 45° 角宽沟槽形成全反射切面,该结构使得入射光在较小的区域内实现光场传输方向上 90° 弯折,即构成 90° 弯曲波导. 上方两条平行波导距离为 H ,下方矩形环谐振腔的长宽均为 L . 其中上方的三段波导作为调

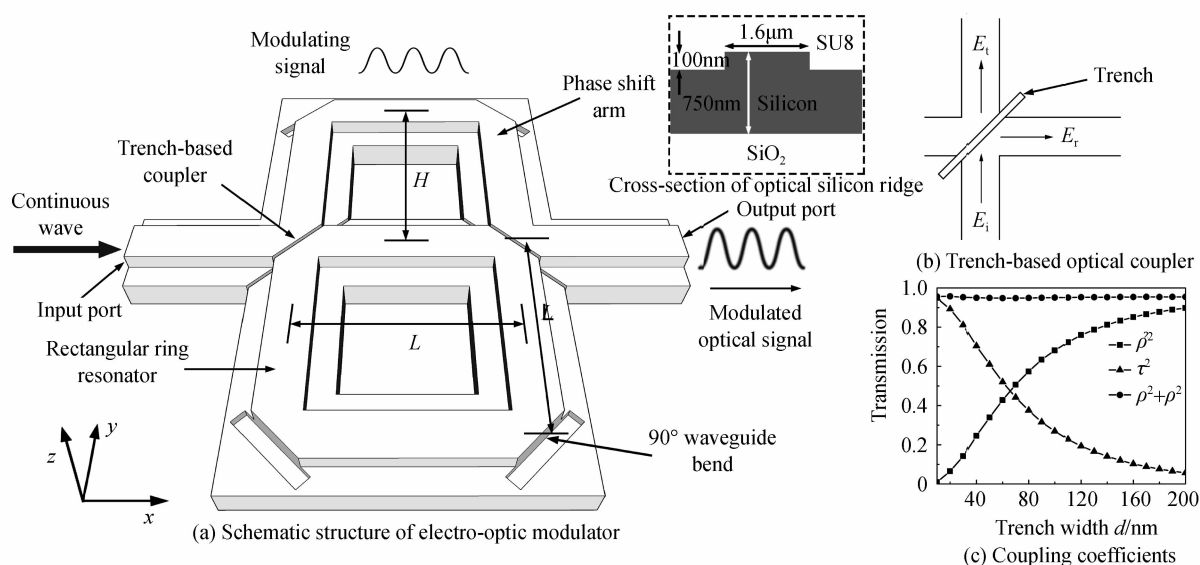


图 1 基于耦合调制矩形环谐振腔电光调制器结构

Fig. 1 Schematic structure of a coupling modulation based electro-optic modulator with a rectangular ring resonator

制相移臂,施加电压使其折射率发生变化,从而使调制相位发生改变.为实现耦合调制,这里设置优化值 $H=0.75L$,即相移臂的总长度为矩形腔边长的 2.5 倍.连续光从左端的波导输入至器件,在外加调制信号作用下,器件右波导输出已调制的光信号.器件设计以 SOI 脊型波导为例,图 1 插图为 1 550 nm 波长单模波导截面图.其中采用波导下包层为 SiO_2 ,上包层为 SU8 聚合物,波导宽度为 $1.6 \mu\text{m}$,内脊高 750 nm,外脊高 650 nm.另外该结构也同样适用于 SiO_2 、GaAs、InP 等衬底材料的大截面脊波导.

1.2 沟槽型光耦合器工作原理

沟槽型光耦合器是利用基于光波的受抑全内反射(Frustrated Total Internal Reflection, FTIR)原理^[13].光通过输入波导进入窄开口沟槽,当沟槽内部填充介质的折射率小于波导材料的折射率,且倏逝波与沟槽的宽度可以相比拟时,一部分倏逝波隧穿过沟槽达到对面的介质面形成穿透光波;另一部分倏逝波通过古斯-汉欣(Goos Hanchen)位移现象形成反射光波.如图 1(b),耦合光场可以表示为输入输出光的电场幅度分量,其中 E_i 表示输入光电场分量, E_r 表示反射光电场分量, E_t 表示透射光电场分量.对于任意宽度的沟槽型耦合器,反射分光系数 $\rho=|E_r|/|E_i|$,透射分光系数 $\tau=|E_t|/|E_i|$.对于不同宽度的波导,反射及透射系数主要受沟槽开口宽度、沟槽内部填充介质折射率的影响^[14].耦合器分光满足能量守恒定律,表示为

$$\rho^2 + \tau^2 = 1 - \alpha_c \quad (1)$$

式中 α_c 为耦合器自身的能量损耗,原因是在耦合过程中,会有部分光波透过沟槽边角泄露到衬底中造成损耗.此外由于制备工艺的原因,如沟槽位置偏移、宽度和角度误差等都可能引起相应的损耗^[15-16].研究表明沟槽损耗是限制矩形环谐振腔 Q 值的主要原因之一^[17].

2 时域离散动态模型

带有环形谐振腔结构的光学器件,其内部形成稳定的光场分布需要一定的时间,特别是当调制频率较高时,延迟时间是影响调制带宽等特性的重要因素.因此静态的耦合模理论(Couple mode theory)无法完整地展现器件的动态性能^[18-19].本文采用时域离散的动态模型,通过迭代计算对器件内光场进行精确模拟.

图 2 展示了器件内光信号走向,其中 E_i 和 E_o 表示输入和输出信号电场分量, $E_1 \sim E_6$ 分别为内部耦合器端口输出光信号的电场分量.两个虚线圆形框内的流程图分别展示了两个沟槽型光耦合器的分光/合光过程.对于第一个沟槽型耦合器(靠近输入端),传输矩阵表达式为

$$\begin{bmatrix} E_2(t) \\ E_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i\rho & \tau \\ \tau & -i\rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i(t) \\ E_1(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

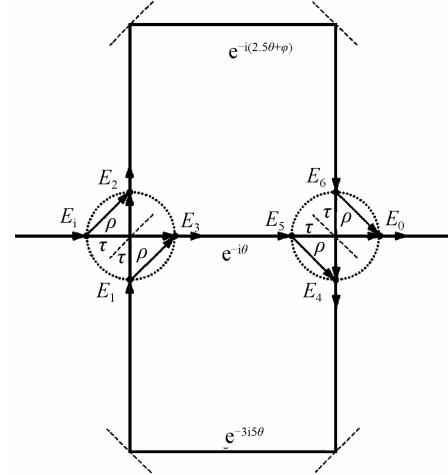


图 2 矩形环谐振腔电光调制器内部信号流程图
Fig. 2 Signal flow diagrams of rectangular ring based electro-optic optical modulator

式中 t 为离散的时间变量,由于沟槽开口宽度较窄,光信号通过耦合器的时间远小于离散时间单位,因此可以将其视为没有延迟的耦合.而对于其它的光信号而言,通过一定长度的波导会产生时间和相位上的延迟.设置通过长为 L 的波导时间延迟为 Δt ,则有

$$E_5(t) = 10^{-\alpha L/20} E_3(t - \Delta t) e^{-i\theta} \quad (3)$$

$$E_6(t) = 10^{-2.5\alpha L/20} E_2(t - 2.5\Delta t) e^{-i(2.5\theta+\varphi)} \quad (4)$$

式中 φ 为外加调制电信号引起的相移臂调制相位的变化量,所采用的电驱动方式与外加电压会呈现不同的线性关系^[1, 20]; α 为单位长度波导损耗,其单位是 dB/cm,由波导材料、结构以及制备质量决定; θ 为不同波长光通过长度为 L 的波导的相位变化.对于等效折射率为 n_{eff} 的波导满足关系式

$$\theta = 2\pi n_{\text{eff}} L / \lambda \quad (5)$$

同理,对于第二个沟槽型耦合器(靠近输出端)和连接此耦合器的下半部分波导,其电场分量分别为

$$\begin{bmatrix} E_o(t) \\ E_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i\rho & \tau \\ \tau & -i\rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_6(t) \\ E_5(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$E_1(t) = 10^{-3\alpha L/20} E_4(t - 3\Delta t) e^{-3i\theta} \quad (7)$$

采用英国 Photon Design 公司的商业化 FIMMWAVE 模式求解器软件模拟图 1 插图所示的波导结构,TE 基模的有效折射率 $n_{\text{eff}} = 3.358$.为方便实现电驱动,选取 $L = 6.85 \mu\text{m}$ 、波导损耗 α 为 2 dB/cm 进行仿真.求解式(2)~(7)并从 $t=0$ 时刻开始进行循环迭代,在 $t < 0$ 时,器件内没有光场分布,因此 $E_1 \sim E_6$ 的幅度为零.根据得到的 $t > 0$ 任意时刻的调制器光输出特性,可以仿真器件的各种调制性能参量.

3 仿真结果与分析

图 3 展示了耦合器损耗 $\alpha_c = 0.05$ 在不同分光系数

条件下调制器稳态频率响应特性曲线,其中归一化输出光功率正比于迭代输出光电场分量的平方.为得到较好的调制深度,选取两种情况下具有较高消光比参量的曲线作为对比.从图中可以看出,矩形环谐振腔具有较高的Q值.对于不同的调制相位 φ ,当 ρ 值与 τ 值相等时(即3 dB分光),会出现明显的谐振峰漂移(图3(a));而对 ρ 值较大的情况,谐振峰值漂移较小(图3(b)).

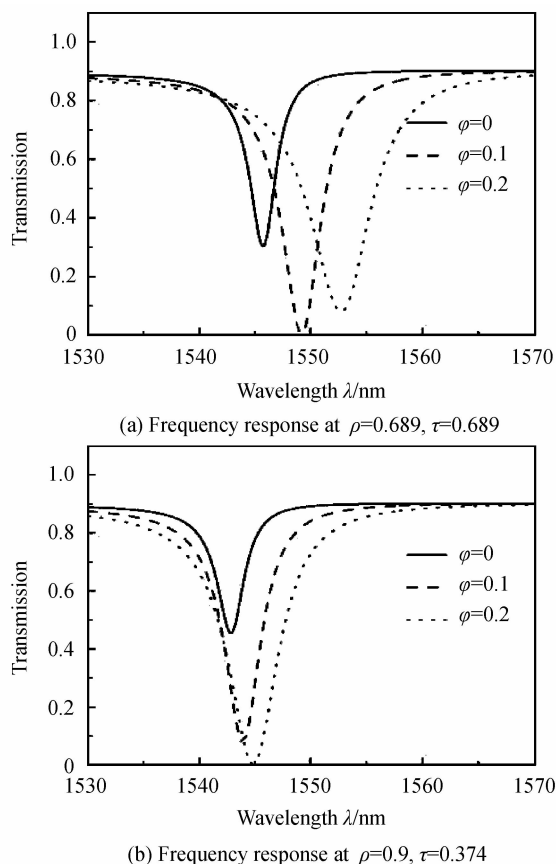


图3 基于耦合调制的矩形环调制器的稳态频率响应曲线
Fig.3 Static frequency responses of coupling modulation based rectangular ring modulator

对于不同电驱动方式,调制相位 φ 随外加调制电压线性变化.图4展示了 $\rho=0.689$ 和 $\rho=0.9$ 情况下输出光随调制相位 φ 的变化情况.对比传统的马赫-曾德

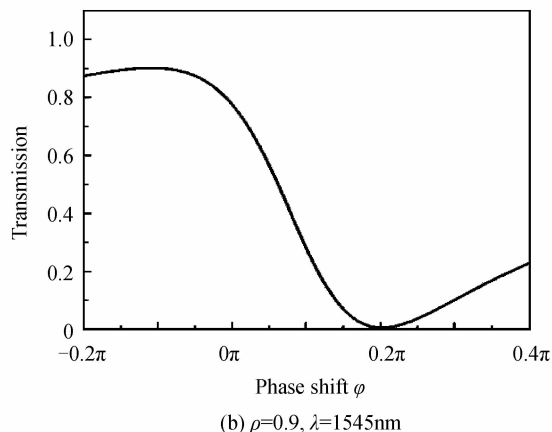
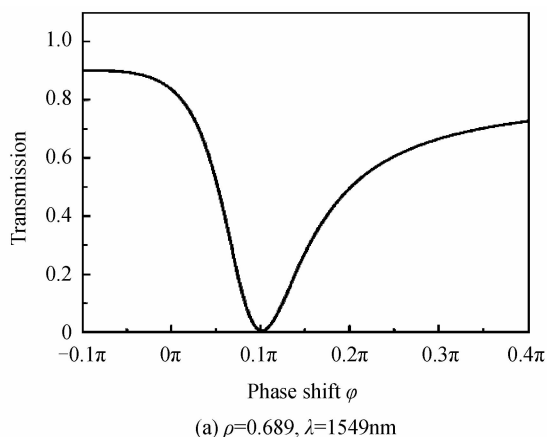


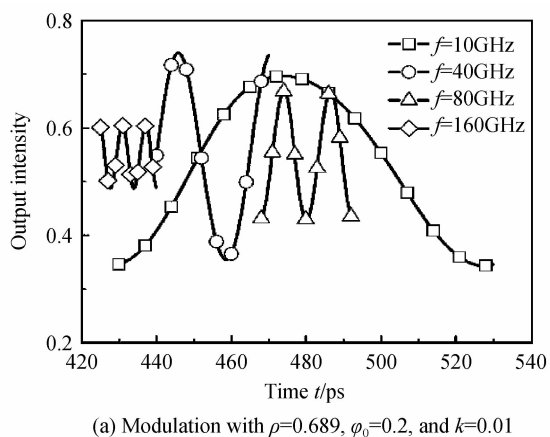
图4 调制器的传输特性与回馈相移臂的相位调制关系曲线
Fig4 Transmission characteristic dependency on the phase modulation of feedback arm

干涉仪等光调制器,本文设计的光调制器在 φ 发生较小变化时就可实现输出光的通断,并且具有良好的线性度.同时引入较小的外加调制电压,使得调制能耗较低,即单位比特所需调制能量较小.

调制相位 φ 在外加正弦小信号调制电压下,可以表示为

$$\varphi = \varphi_0 + k \sin(2\pi ft) \quad (8)$$

式中 φ_0 为直流偏置引起的相位变化, k 为正弦信号幅度值, f 为所加调制信号频率.将偏置点选择在图4所示调制曲线的线性区域,图5展示了不同频率调制信号的输出强度曲线,直流偏置点和幅度值分别选择为 $\varphi_0=0.15, k=0.05$ 和 $\varphi_0=0.2, k=0.01$.该调制器与传统的马赫-曾德干涉型调制器最大的区别在于环形谐振腔中存有部分谐振光,因此调制相位改变所引起的静态输出变化并不能瞬时反映在输出端,特别对于高频调制,输出光功率的变化受到环形腔内部光的干涉影响,需要一定的时间重新回到平衡.调制区域越大,高频信号消光比就越大,但相反的低频部分会出现信号畸变(图5(b)).因此在器件设计过程中,需要在调制深度和线性度的选择上做出平衡.图5(c)展示了分光系数 $\rho=0.9$ 时的调制输出曲线,与透射与反射分光



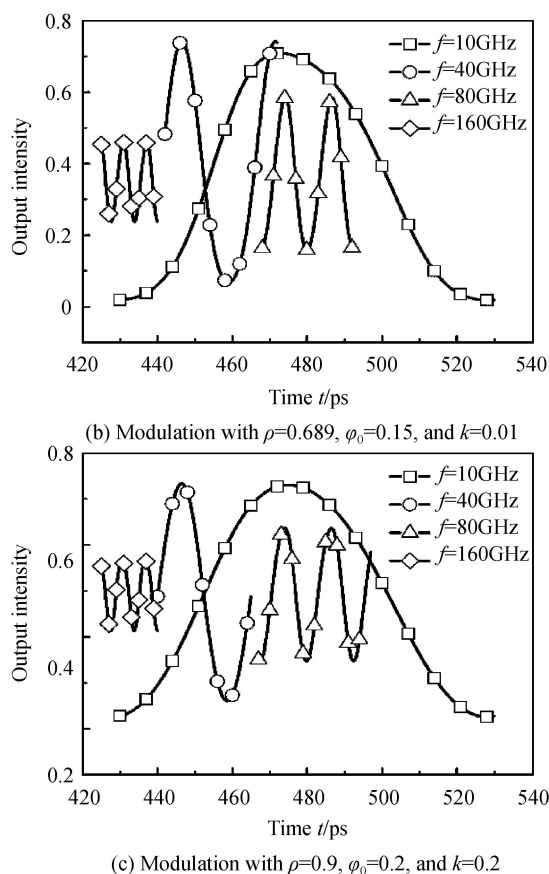


图5 调制器在不同调制速率下的耦合调制强度输出曲线
Fig. 5 Intensity modulation at the various modulation bandwidths

系数相等的前两种情况不同的是,在形成稳态输出时大量光从相移臂传输,少量光进入矩形环腔,这使得环腔能量注入时间较长,但相应对正弦小信号调制的响应速度也越快,因此在低频区域信号的保形良好,高频区域带宽有所降低。

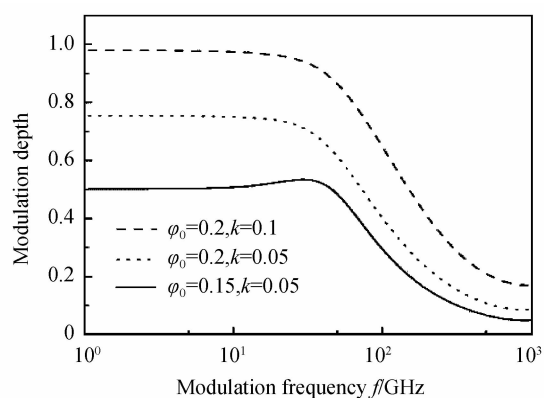
调制深度 d 是一个衡量调制器动态性能的重要参量,与输出光功率 P 的关系定义为

$$d = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \quad (9)$$

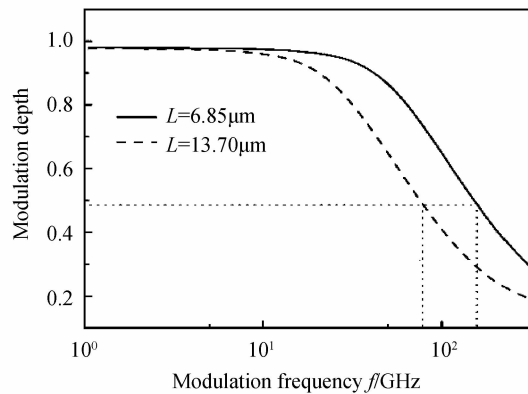
调制深度表示调制器在稳定输出状态下,输出光功率最大值与最小值的对比度,归一化最大值为 1,调制深度越接近 1 表示其调制性能越好.通常将调制深度下降一半时所对应的频率称为调制带宽。

为估算基于耦合调制矩形环谐振腔电光调制器的调制带宽,图 6(a)展示了调制深度在不同相位调制区随调制信号频率的变化情况.调制区域越大,对应的调制电压幅值越大,调制深度有所增加.调制器在 $\phi_0 = 0.2, k = 0.1$ 的情况下,器件静态调制深度大于 0.96,调制带宽大于 100 GHz.在调制相位和电压幅度等其它条件维持不变的情况下,分别对比了 $L = 6.85 \mu\text{m}$ 和 $L = 13.7 \mu\text{m}$ 两种矩形环边长长度条件下调制深度的变化情况,如图 6(b), L 越小,其调制带宽越大,小的

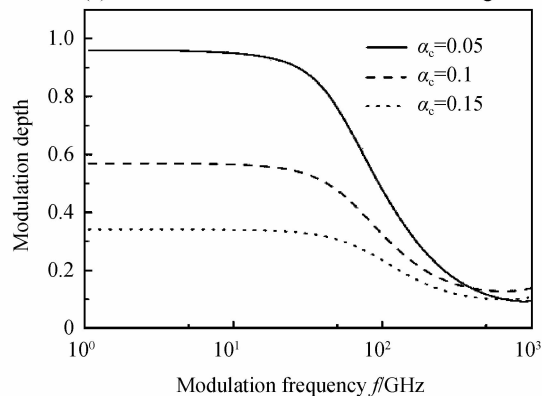
波导长度 L 对应的谐振腔长越小,导致其 FSR 越大.由于基于耦合调制的方式缓解了腔内光子寿命对调制带宽的限制,因此环形谐振腔的长度减小,调制带宽将得到明显的增加.在 $\phi_0 = 0.2, k = 0.1, L = 6.85 \mu\text{m}$ 的条件下,图 6(c)展示了因制备工艺等原因引起的沟槽型光耦合器损耗对器件性能的影响.随着损耗增大,矩形环腔的 Q 值减小,对应的调制带宽以及调制深度都减小.矩形环谐振腔电光调制器采用沟槽型耦合器结合 90° 弯曲波导,克服了传统微环弯曲损耗对曲率半径的限制,并进一步减小环腔长度和器件的片占面积,降低单位比特所需的能量,获得更大带宽的同时,显著增加了器件的集成度。



(a) Modulation bandwidth at various phases and amplitudes



(b) Modulation bandwidth at two resonator lengths



(c) Modulation bandwidth at various coupler losses

图6 调制深度随调制频率的变化关系
Fig. 6 Modulation depth as a function of modulation frequency

4 器件功能仿真

为进一步验证器件的调制功能,采用时域有限差分(FDTD)法对图 1(a)的结构进行功能仿真验证. FDTD 能够较为精确地模拟微纳光子器件,但需要较大的计算资源,带有环腔结构的光学器件使用 3D 仿真需要的资源更多. 由于本文设计的器件结构在竖直结构上较为简单,因此只需计算 z 方向上的等效折射率,然后映射在二维平面上进行仿真,即可在较小的计算资源下获得相对准确的模拟结果.

器件结构仿真设置为如图 1(a)所示 x, y 方向二维结构,其等效折射率同图 1 插图波导结构. 设定 $L = 6.85 \mu\text{m}$, 沟槽开口宽度为 129 nm , 其对应的反射分光系数与透射分光系数近似相等. 改变反馈相移臂的等效折射率,通过对比传输曲线可以看出,特别在波长 $\lambda_m = 1\,509 \text{ nm}$ 处,传输曲线随折射率变化而产生较大变化,如图 7. 需要指出的是,与动态时域模型得出的结论不同,沟槽型耦合器对不同波长的分光系数略有不同,且传输光经过耦合器时由于古斯-汉欣位移现象的影响,在波导内部并不严格按直线传输,导致光程的长度与设计不相等,最终导致谐振峰值与理想状态

有偏差^[17]. 图 8(a)和(b)分别展示了 $\Delta n = 0$ 和 $\Delta n = 0.02$ 条件下 $\lambda_m = 1\,509 \text{ nm}$ 波长光在器件内部的光功率分布情况. 当相移臂折射率不变时,光从相移臂传输,器件处于 ON 状态. 而当折射率发生轻微改变 ($\Delta n = 0.02$), 光耦合进入下方矩形环谐振腔,对该波长光波的传输率显著变低,器件处于 OFF 状态,因此产生光波调制效应.

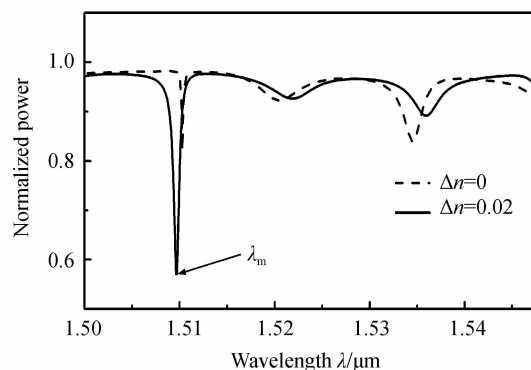


图 7 反馈相移臂的不同等效折射率条件下 FDTD 法仿真器件归一化传输曲线

Fig. 7 Comparison of normalized transmission responses of the optical modulator with both effective indices tuned in the feedback arm by using FDTD method

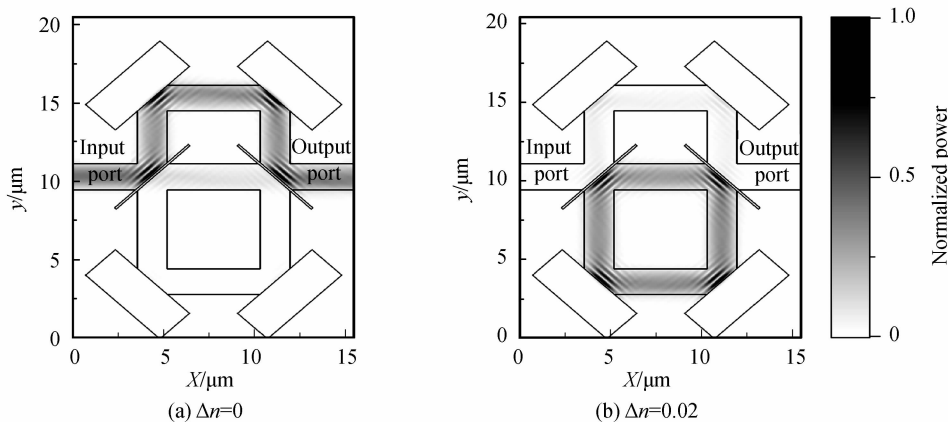


图 8 在 $\Delta n = 0$ 和 $\Delta n = 0.02$ 条件下波长 $\lambda_m = 1\,509 \text{ nm}$ 时器件内光功率分布图

Fig. 8 Optical power distribution profiles inside the device at $\Delta n = 0$, and $\Delta n = 0.02$ for the resonant wavelength of $\lambda_m = 1\,509 \text{ nm}$, respectively

5 结论

本文提出一种基于耦合调制方式的高效紧凑电光调制器. 器件由基于受抑全内反射原理的沟槽型光耦合器和 90° 弯曲波导构成矩形环谐振腔, 结合非对称马赫-曾德尔干涉仪结构, 可以实现相比于传统微环谐振腔更紧凑的器件配置. 时域离散动态模型仿真结果表明该器件的调制特性曲线, 与传统调制器结构相比, 可以在较小的调制区域内 ($\Delta\varphi < 0.2\pi$) 实现较大的消光比光输出, 有效减小调制所需的功耗. 此外, 采用耦合

调制法相对于微环环内折射率调制法, 突破了腔内光子寿命对调制带宽的限制, 调制器带宽大于 100 GHz . 该器件采用沟槽型耦合器代替传统的 Y 分支、定向耦合器、和多模干涉耦合器等分光方法, 实现在较小区域内 (与交叉波导的面积相当) 的分光/合光, 这种耦合方式更易于将马赫-曾德尔干涉仪结构与环形谐振腔结合起来, 有效地减小器件尺寸, 使传统一维方向堆砌的器件有利于向二维方向扩展和配置. 本文的器件设计可应用于单片光子集成电路, 如高密度片上的光互连系统.

参考文献

- [1] WANG Xing-jun, SU Zhao-tang, ZHOU Zhi-ping. Recent progress of silicon photonics [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2015, **45**(1):014201.
王兴军, 苏昭棠, 周治平. 硅基光电子学的最新进展[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2015, **45**(1):014201.
- [2] WANG Wei-nan, LI Yan-he, ZHENG Xiao-ping, *et al.* Modelling of fiber radio link using mach zehnder modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 159-165.
王伟南, 李艳和, 郑小平, 等. 应用马赫-曾德尔调制器的光微波链路建模[J]. 光学学报, 2007, **27**(1):159-165.
- [3] CAO Tong-tong, ZHANG Li-bin, FEI Yong-hao, *et al.* Design of a high-speed silicon electro-optical modulator based on an add-drop micro-ring resonator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(19): 194210.
曹彤彤, 张利斌, 费永浩, 等. 基于 Add-drop 型微环谐振腔的硅基高速电光调制器设计[J]. 物理学报, 2013, **62**(19): 194210.
- [4] CHI Hao, ZHANG Xian-min, SHEN Lin-fang. Inter-modulation distortion analysis for single-drive mach-zehnder modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1619-1622.
池灏, 章献民, 沈林放. 单极型马赫曾德尔调制器的互调失真分析[J]. 光学学报, 2006, **26**(11):1619-1622.
- [5] PAN Jian-xia, WANG Fan, YANG Jian-yi. Linearity of microring-assisted Mach-Zehnder optical modulators[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1511-1515.
潘剑侠, 王帆, 杨建义. 微环辅助 Mach-Zehnder 光调制器的线性特性[J]. 光子学报, 2008, **37**(8):1511-1515.
- [6] ZHANG Qiang, HUANG De-xiu, ZHANG Xin-liang, *et al.* Ring and phase assisted Mach-Zehnder modulator for radio-over-fiber system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2194-2199.
张强, 黄德修, 张新亮等. 用于光纤无线通讯的微环相位辅助型马赫-曾德尔调制器[J]. 光学学报, 2007, **27**(12):2194-2199.
- [7] WESLEY D S, JOYCE K S P. Dynamics of microring resonator modulators[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(20): 15741-15753.
- [8] SACHER W D, POON J K S. Characteristics of microring resonators with waveguide-resonator coupling modulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(17): 3800-3811.
- [9] ZHOU L, POON A W. Electrically reconfigurable silicon microring resonator-based filter with waveguide-coupled feedback[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(15): 9194-9204.
- [10] ZHANG X, ZHUANG T, XUE X, *et al.* Tunable optical ring resonator integrated with asymmetric Mach-Zehnder interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(17): 2512-2520.
- [11] SACHER W D, GREEN W M J, ASSEFA S, *et al.* Coupling modulation of microrings at rates beyond the linewidth limit [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(8): 9722-9733.
- [12] LIN H, OGBUU O, LIU J, *et al.* Breaking the energy-bandwidth limit of electrooptic modulators: theory and a device proposal [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(24): 4029-4036.
- [13] MACFARLANE D L, CHRISTENSEN M P, LIU K, *et al.* Four-port nanophotonic frustrated total internal reflection coupler[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(1): 58-60.
- [14] QIAN Y, KIM S, SONG J, *et al.* Compact trench-based silicon-on-insulator rib waveguide ring resonator with large free spectral range[J]. *Optical Engineering*, 2009, **48**(12): 124602.
- [15] LIU K, HUANG H, MU S, *et al.* Ultra-compact three-port trench-based photonic couplers in ion-exchanged glass waveguides[J]. *Optics Communications*, 2013, **309**: 307-312.
- [16] LIU Ke, MU Si-xuan, 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): 0213001.
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):0213001.
- [17] WANG Shuang, LIU Ke. Ultra-compact optical filter with rectangular ring resonator and mach-zehnder Interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(5): 0513001.
王爽, 刘克. 马赫-曾德尔结合矩形环谐振腔的超紧凑光滤波器[J]. 光学学报, 2015, **35**(5):0513001.
- [18] HONG J, ENAMI Y. Modeling and analysis of microring resonator modulators with feedback waveguide coupling[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(21): 3243-3249.
- [19] ZHOU Zhen, LIU Jin-xin, FENG Li-shuang. Simulation and analysis on dynamic characteristics of Si-based micro-ring modulator[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, **35**(3): 390-394.
周震, 刘靖鑫, 冯丽爽. 硅基微环光学调制器动态特性模拟与分析[J]. 半导体光电, 2014, **35**(3):390-394.
- [20] FENG Song, GAO Yong. Optimization of the micro-nano PIN electro-optic modulator[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2014, **25**(5): 870-875.
冯松, 高勇. 微纳米 PIN 电光调制器的优化[J]. 光电子? 激光, 2014, **25**(5):870-875.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61377059), the Beijing Municipal Natural Science Foundation (No. 4142004), Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry and Importation and Development of High-Caliber Talents Project of Beijing Municipal Institutions