

# 基于 Add-drop 型微环谐振腔的硅基高速电光调制器设计\*

曹彤彤 张利斌 费永浩 曹严梅 雷勋 陈少武†

(中国科学院半导体研究所, 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

(2013年4月27日收到; 2013年6月19日收到修改稿)

相比于传统的 All-pass 型微环谐振腔硅基电光调制器, Add-drop 型微环谐振腔可提供更多的设计自由度, 使调制器在不改变杂质掺杂浓度的情况下就能在调制带宽和消光比性能上获得均衡考虑. 本文设计了基于 Add-drop 型微环谐振腔的高速、且在低调制电压下实现大消光比的硅基电光调制器, 所用微环谐振腔的半径仅仅为 20  $\mu\text{m}$ . 重点分析了直波导与微环谐振腔的耦合对调制器性能的影响, 发现较小的 Drop 端耦合系数有利于消光比的提高, 但是不能同时达到最佳的调制带宽, 因此设计上存在一个带宽和消光比性能上的折中考虑. 根据优化设计的结果进行了实际器件的制作和测试. 静态光谱测试表明, 在 3 V 反向偏置电压的作用下, 调制器的消光比最大可达 12 dB. 动态电光响应测试中, 在仅仅 1.2 V 的信号幅值电压下测得了 8 Gbps 数据传输速率的清晰眼图.

**关键词:** 电光调制器, 绝缘体上的硅, 微环谐振腔, 载流子色散效应

**PACS:** 42.82.-m, 42.79.Hp

**DOI:** 10.7498/aps.62.194210

## 1 引言

作为电互连传输瓶颈<sup>[1]</sup>的一种解决方案, 光互连<sup>[2]</sup>具有低损耗、低延迟、宽频带、低电磁干扰等特点, 以光互连代替电互连将是未来的一大发展趋势. 硅基光互连<sup>[3]</sup>是指利用硅基光子器件进行光互连, 其制作工艺与传统的 CMOS 工艺兼容, 在制作成本上拥有巨大的潜在优势. 硅基电光调制器是硅基光互连的重要组成部分<sup>[4]</sup>, 因此, 对其性能的研究具有十分重要的意义. 由于硅是中心反演对称晶体, 没有线性电光效应, 因此硅基波导中的电光调制往往利用硅材料的载流子色散效应<sup>[5]</sup>. 通过改变硅基波导中的载流子(电子和空穴)浓度, 就可以改变波导的有效折射率和光波的相位, 从而实现电光调制. 通常有两种调制方式: 一种是基于正向偏置电压的调制<sup>[6,7]</sup>, 在波导中做 pin 结掺杂, 其特点是调制效率高, 但是由于受限于较缓慢的载流子输运过程, 其带宽往往较低; 另

一种是基于反向偏置电压的调制<sup>[8-11]</sup>, 在波导中做 pn 结掺杂, 在反向偏置电压下由于 pn 结未处于导通状态, 所以其载流子输运非常快, 带宽也通常较高. 在光学结构上, 基于微环谐振腔的反偏 pn 结型电光调制器具有结构紧凑, 调制电压低的特点, 近年来成为国内外研究的热点<sup>[9-11]</sup>. 然而, 目前微环型调制器大部分都是基于 All-pass 型微环, 基于 Add-drop 型微环的调制器相关的分析和器件制作则较少报道. 由于存在 Drop 端光输出, 基于 Add-drop 型微环的调制器能够通过调整 Drop 端的 Gap 值来改善消光比与带宽, 而不必改变 pn 结的掺杂工艺. 因此, 我们对基于 Add-drop 型微环的反偏 pn 结调制器做了分析和设计. 重点讨论了直波导与微环谐振腔的耦合对调制器性能的影响, 并进行了实际器件的制作和测试. 测试结果表明, 所制作的器件具有较大的静态消光比(3 V 反偏电压时约 12 dB)和较高速的数据传输性能(8 Gbps 数据传输速率).

\* 国家自然科学基金(批准号: 60837001, 61021003)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: swchen@semi.ac.cn

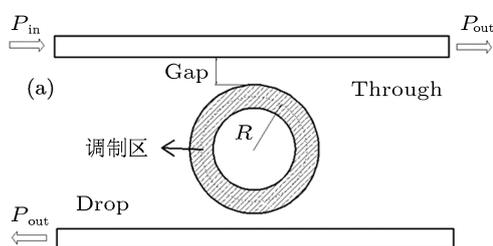
## 2 设计和仿真

### 2.1 器件结构和工作原理

器件的整体结构俯视图如图 1(a) 所示, 光学结构为 Add-drop 型微环, 由两条直波导和一个微环谐振腔波导构成, 微环谐振腔的半径为  $R = 20 \mu\text{m}$ , 波导采用基于 SOI 的脊型光波导. 在谐振腔微环波导内外侧分别做 p 型和 n 型杂质掺杂, 在波导脊形区就会形成 pn 结, 如图 1(b) 所示. 当 pn 结外加反偏电压发生变化时, pn 结的宽度也会发生变化. 根据硅波导中的载流子色散效应, 波导内硅材料的折射率与载流子浓度有关. 这样, 外界电压的变化最终将导致波导有效折射率的变化. Add-drop 型微环的 Through 端输出光强透射率与器件各参数的关系<sup>[12,13]</sup>如下:

$$T_{\text{Through}} = \frac{|E_t|^2}{|E_i|^2} = \left| \frac{t_1 - \alpha t_2 e^{j\varphi}}{1 - \alpha t_1 t_2 e^{j\varphi}} \right|^2 = \frac{(t_1 - \alpha t_2)^2 + 4\alpha t_1 t_2 \sin^2(\varphi/2)}{(1 - \alpha t_1 t_2)^2 + 4\alpha t_1 t_2 \sin^2(\varphi/2)}, \quad (1)$$

其中  $t_1$  和  $t_2$  分别表示微环与输入端 (Through 端) 波导以及下载端 (Drop 端) 波导的振幅透射率, 在忽略耦合区损耗的情况下与耦合系数满足  $\kappa_1^2 + t_1^2 = 1$  和  $\kappa_2^2 + t_2^2 = 1$  的关系;  $\alpha = e^{-\alpha_0 L/2}$  表示光在环内传输一周的振幅损耗因子, 其中  $\alpha_0$  表示微环的传输损耗,  $L = 2\pi R$  表示微环的周长;  $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} L$  表示光在微环内传输一周后的相位变化, 其中  $n_{\text{eff}}$  表示波导的有效折射率,  $\lambda$  表示入射光波长. 因此, 根据



上述关系, 通过改变调制区波导的反偏电压, 从而改变波导的有效折射率, 就可以实现对输出光强的调制.

调制带宽是电光调制器的重要性能参数, 对于硅基微环型电光调制器来说, 通常由器件的光响应和电响应共同决定<sup>[9]</sup>. 其中电响应指调制带宽受调制区载流子运输的影响, 并与调制区驱动电极的寄生 RC 常数有关; 光响应指由微环谐振腔内的光子寿命引起的带宽限制, 通常是影响基于微环谐振腔的反偏 pn 型硅基电光调制器带宽的主要因素. 其带宽 (BW) 和微环 Q 值的关系可以表示为<sup>[11]</sup>

$$\text{BW} = c/(\lambda Q), \quad (2)$$

其中  $c$  表示真空中光的传播速度,  $\lambda$  为入射光波长,  $Q$  值与微环各参数的关系为

$$Q = (\pi n_g L / \lambda) \frac{\sqrt{\alpha t_1 t_2}}{\sqrt{|(1 - \alpha t_1 t_2)^2 - 2(t_1 - \alpha t_1 t_2)^2|}}, \quad (3)$$

其中  $n_g$  表示光在波导中传输的群速度. 如果采用 Through 端作为调制器的光输出端, 并设输出较强光信号时的状态为调制器的“On”状态, 输出较弱光信号时的状态为“Off”状态, 则调制器的消光比 (ER) 可以表示为

$$\text{ER} = -10 \cdot \lg \frac{T_{\text{Through}|_{\text{On}}}}{T_{\text{Through}|_{\text{Off}}}}, \quad (4)$$

其中  $T_{\text{Through}|_{\text{On}}}$  和  $T_{\text{Through}|_{\text{Off}}}$  分别表示“On”状态和“Off”状态的输出光强透射率. “On”状态所引入的额外损耗可以表示为

$$\text{Loss} = -10 \cdot \lg(T_{\text{Through}|_{\text{On}}}). \quad (5)$$

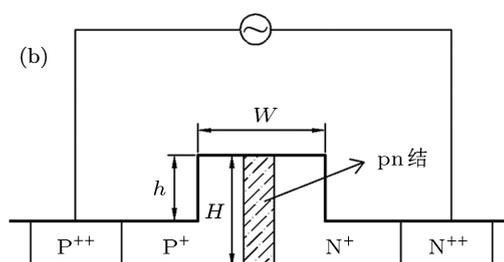


图 1 (a) 器件的整体结构俯视图; (b) 调制区的结构图

### 2.2 波导结构的设计

在高速数据传输的应用中, 如果光波导支持多个模式, 每个模式传播信号的速率不一样, 将会引起数据码间干扰, 严重影响接收端对信号的解读,

因此应该保证波导是单模工作的. 我们使用的 SOI 芯片为新加坡 IME 的顶层硅厚度为 220 nm 的晶片, 埋氧层厚度为 2  $\mu\text{m}$ . 为了保证光波导的单模传输, 刻蚀深度采用 160 nm, 波导宽度采用 500 nm, 波导上面覆盖一包层二氧化硅. 利用基于薄膜模式

匹配法的商用光波导仿真软件 Fimmwave<sup>[14]</sup> 计算波导中的模式, 结果表明, 所得的模式中仅仅有一个是导模, 为准 TE 模, 剩下都是辐射模, 不存在 TM 导模. 准 TE 模的模场分布如图 2 所示, 模式的有效折射率为 2.494, 群折射率为 3.8.

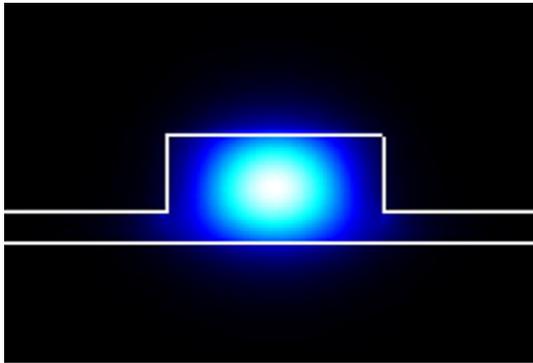


图 2 波导准 TE 模的模场分布

### 2.3 直波导与微环谐振腔耦合的设计

根据前面分析可知, 直波导与微环谐振腔之间的耦合会对电光调制器的输出特性有所影响, 因此需要加以优化设计. 利用基于本征模叠加法的光波导仿真软件 Fimmprop<sup>[14]</sup> 计算得到不同直波导和微环之间的 Gap 值对应的耦合系数如图 3(a) 所示, 随着 Gap 值的增大, 直波导和弯曲波导的光相互作用越弱, 耦合系数也越小. 微环中的传输损耗由弯曲损耗和由掺杂工艺、刻蚀工艺等引起的吸收、散射损耗决定. 弯曲损耗根据仿真软件计算可得约 0.9 dB/cm, 由掺杂工艺、刻蚀工艺等引起的其他损耗根据器件制作采用的工艺<sup>[15]</sup> 可知约为 10 dB/cm. 因此微环内总的传输损耗约 10.9 dB/cm, 振幅衰减因子  $\alpha = 0.9844$ . 同样, 根据文献中的结果, 经计算可得波导有效折射率的改变值随 pn 结反偏电压的变化如图 3(b) 所示. 可以看出, 随着反偏电压的增加, 其折射率相对无偏压情况的增加值不断增大. 在 1 V 反偏电压作用下, 波导有效折射率的改变值约为  $5.4 \times 10^{-5}$ .

为了探讨 Through 端直波导与微环耦合以及 Drop 端直波导与微环耦合对调制器性能的影响, 我们首先给定 Through 端直波导与微环之间的 Gap 值为 250 nm, 并假定调制器 “On” 状态的额外损耗为 2 dB, 调制区外加反偏电压大小为 2 V. 计算得到 Drop 端直波导与微环的耦合系数  $k_2$  与调制器带宽和静态电光响应消光比之间的关系如图 4(a) 所示.

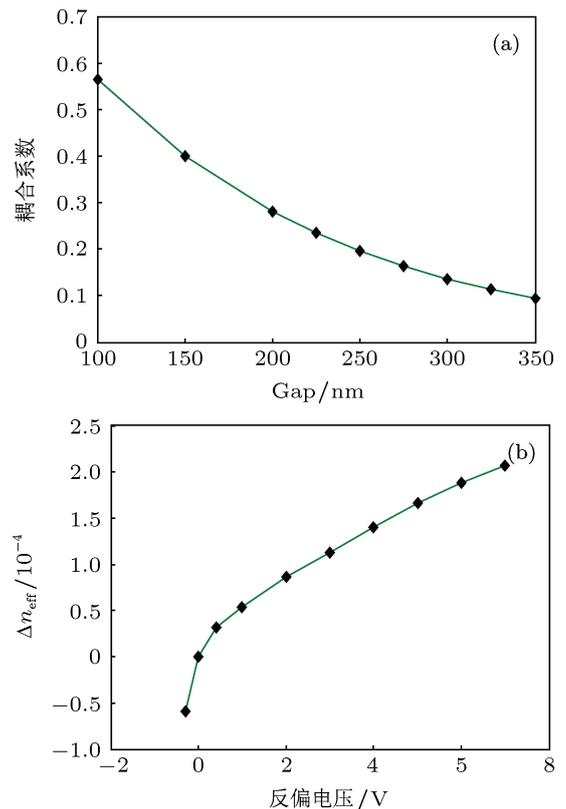


图 3 (a) 耦合系数与 Gap 值的关系; (b) 有效折射率的改变值随反偏电压的变化

可以看出, 较小的耦合系数对应着更大的消光比, 而随着耦合系数的减小, 带宽首先增大然后逐渐减小. 当耦合系数减为 0 时, 就对应 All-pass 微环的情况, 此时虽然消光比可以很大, 但是器件的带宽非常低. 为了得到高消光比并且良好的带宽特性, 我们选择 Drop 端直波导与微环之间的 Gap 值为 300 nm, 此时耦合系数  $k_2 = 0.1365$ ,  $t_2 = 0.9906$ , 对应的带宽为 8.8 GHz, 消光比约 8 dB. 当 Through 端的直波导与微环之间的 Gap 值分别为 200 nm, 230 nm, 250 nm, 300 nm 时, 不同反偏电压下调制器的静态电光响应消光比如图 4(b) 所示. 四种情况对应的带宽分别为 12.4 GHz, 10.3 GHz, 8.8 GHz 和 5.2 GHz. 对于 Gap 值为 200 nm 的情况, 带宽最高, 消光比随着反偏电压的增加而逐渐增大, 但是变化较缓慢, 微环谐振腔处于深度过耦合状态; 对于 Gap 值为 300 nm 的情况, 虽然在较低电压时, 消光比较大, 但是最大消光比仅仅 5 dB 左右, 而且带宽很低, 微环谐振腔处于深度欠耦合状态; 对于 Gap 值为 230 nm 的情况, 微环谐振腔处于临界耦合的状态, 此时通过加高反偏电压可以得到非常高的消光比, 比如在 3.8 V 的反偏电压下, 消光比可高达 30 dB; 而对于 Gap 值为 250 nm 的情况, 微环谐

振腔处于轻度欠耦合的状态, 虽然最大消光比没有临界耦合时的大, 但是其在较低的反偏电压范围内 (0—3.2 V) 其消光比都比临界耦合时的大, 同时也具有较高的带宽, 因此我们选择 Through 端直波导与微环之间的 Gap 值为 250 nm 作为最终的器件设计参数, 从而在带宽较高的同时能够保证较低的反偏电压就实现高消光比.

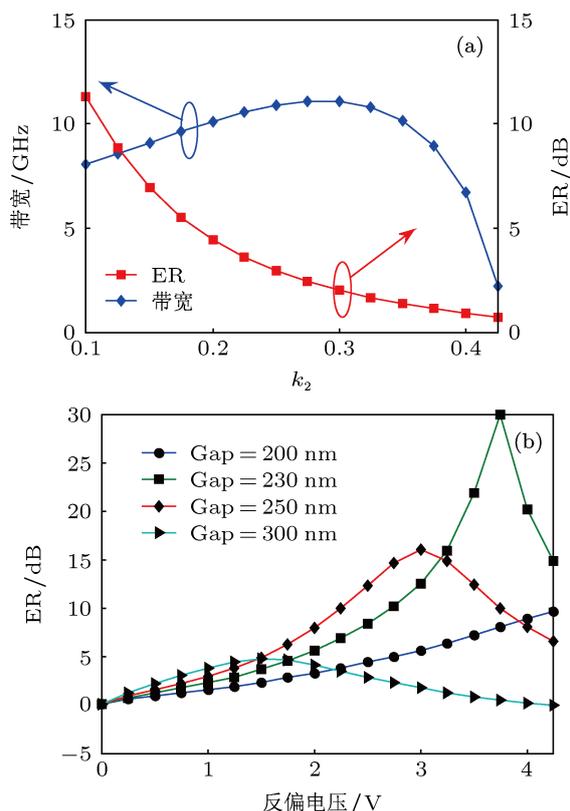


图4 (a) Through 端 Gap 值为 250 nm 时, 不同 Drop 端耦合系数  $k_2$  对应的调制器带宽和 2 V 电压下的消光比; (b) 不同 Through 端 Gap 值对应的消光比随反偏电压的变化

### 3 测试结果

根据前面的设计参数, 我们制作了相应的基于 Add-drop 型微环谐振腔的硅基电光调制器. 器件的 SEM 图如图 5(a) 所示. 对器件施加不同的反偏电压并进行光谱扫描, 得到不同反偏电压下的光谱如图 5(b) 所示. 可以看出, 如果选择入射光波长为 1543.67 nm, 则在 3 V 的反偏电压下调制器的消光比可以达到最大值, 约 12 dB. 与理论计算值相比, 最大消光比稍小, 主要是由于在测试光路中光放大器的输出增益光饱和导致的.

同时我们还做了动态电光响应测试, 利用矢量网络分析仪测得了入射波长为 1543.67 nm, 反偏电压为 -1 V 时的电光响应如图 6(a) 所示. 可以看出,

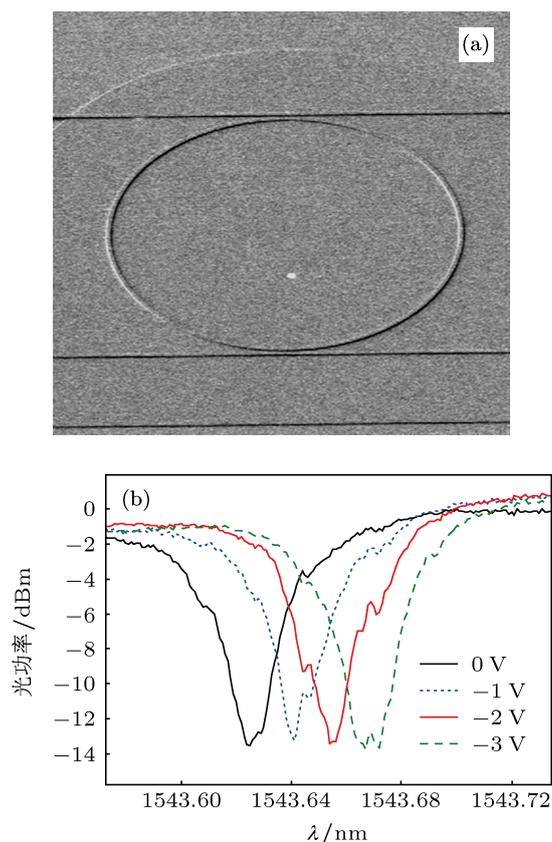


图5 (a) Add-drop 型微环电光调制器的 SEM 图; (b) 不同反偏电压下的光谱

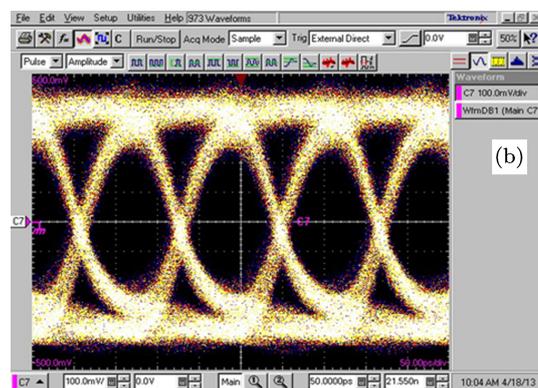
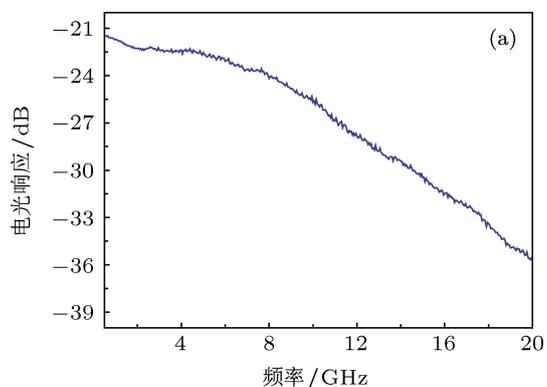


图6 (a) 调制器的电光响应曲线; (b) 8 Gbps 数据传输速率时的测试眼图

电光响应的 3 dB 带宽约 8.5 GHz, 跟前面的理论分析比较接近. 采用伪随机信号发生器作为输入电信号, 并利用光电探测器及高频采样示波器探测输出端的光强变化. 在反偏电压为  $-1$  V, 信号幅值电压  $V_{pp} = 1.2$  V 时, 测得的 8 Gbps 数据传输速率的眼图如图 6(b) 所示. 可以看出, 眼图张开的较好, 表明我们的器件能够应用于传输高频数据信号. 理论上, 更高数据速率的眼图可以被观测到. 因为我们器件的静态消光比较高, 即使高频出现衰减也能够观测到张开的眼图. 然而受限于测试条件, 由于实验台不稳等因素, 导致眼图的测试受周围环境的噪声干扰, 将会在后续的实验中进行改进.

## 4 结论

本文设计并制作了基于 Add-drop 型微环的硅

基电光调制器, 通过引入 Drop 端, 在不改变掺杂工艺的条件下实现了调制器性能的均衡提升, 制作了较高带宽且在低调制电压下实现大消光比的器件. 首先计算了光波导结构的模式以及直波导与光波导的耦合系数与 Gap 值之间的关系, 并重点分析了 Through 端与 Drop 端直波导与微环的耦合对器件消光比以及带宽的影响. 结果表明, 当 Drop 端 Gap 值取 300 nm, 且 Through 端 Gap 值取 250 nm 时, 器件兼顾良好的消光比与较高的带宽. 对实际制作的器件进行了静态光谱测试与动态电光响应测试, 在 3 V 偏置电压的作用下, 静态电光响应的消光比最大可达 12 dB; 给定 1 V 反向偏置, 在 1.2 V 的信号幅值电压下, 我们测得了 8 Gbps 数据传输速率的眼图.

- 
- [1] Wu Y P, Tao Y, Zhang J S, Wang Y G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4395 (in Chinese) [吴懿平, 陶媛, 张金松, 王永国 2010 物理学报 **59** 4395]
- [2] Miller D 2009 *Proceedings of the IEEE* **97** 1166
- [3] Jalali B, Fathpour S 2006 *IEEE J. Lightwave Technol.* **24** 4600
- [4] Reed G T, Mashanovich G, Gardes F Y, Thomson D J 2010 *Nat. Photon.* **4** 518
- [5] Li Y M, Liu Z, Xue C L, Li C B, Cheng B W, Wang Q M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 114208 (in Chinese) [李亚明, 刘智, 薛春来, 李传波, 成步文, 王启明 2013 物理学报 **62** 114208]
- [6] Xu Q, Schmidt B, Pradhan S, Lipson M 2005 *Nature* **435** 325
- [7] Wang F, Qiu C, Xiao S M, Hao Y L, Jiang X Q, Wang M H, Yang J Y 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 104206
- [8] Xu H, Xiao X, Li X Y, Hu Y T, Li Z Y, Chu T, Yu Y D, Yu J Z 2012 *Opt. Express* **20** 15093
- [9] Dong P, Liao S, Feng D, H. Liang, Zheng D, Shafiiha R, Kung C C, Qian W, Li G, Zheng X, Krishnamoorthy A V, Asghari M 2009 *Opt. Express* **17** 22484
- [10] Dong P, Liao S, Liang H, Qian W, Wang X, Shafiiha R, Feng D, Li G, Zheng X, Krishnamoorthy A V, Asghari M 2010 *Opt. Lett.* **35** 3246
- [11] Li G, Zheng X, Yao J, Thacker H, Shubin I, Luo Y, Raj K, Cunningham J E, Krishnamoorthy A V 2011 *Opt. Express* **19** 20435
- [12] Huang Q Z 2009 *Ph.D. Dissertation* (Beijing Graduate School of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [黄庆忠 2009 博士学位论文 (北京: 中国科学院研究生院)]
- [13] Ren G H, Chen S W, Cao T T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 034215 (in Chinese) [任光辉, 陈少武, 曹彤彤 2012 物理学报 **61** 034215]
- [14] FIMMWAVE/FIMMPROP, Version 4.6, Photon Design Ltd, <http://www.photon.com>
- [15] Liow T Y, Ang K W, Fang Q, Song J F, Xiong Y Z, Yu M B, Lo G Q, Kwong D L 2010 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **16** 307

# Design of a high-speed silicon electro-optical modulator based on an add-drop micro-ring resonator\*

Cao Tong-Tong Zhang Li-Bin Fei Yong-Hao Cao Yan-Mei  
Lei Xun Chen Shao-Wu<sup>†</sup>

(State Key Laboratory on Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 27 April 2013; revised manuscript received 19 June 2013)

## Abstract

Silicon electro-optical modulators based on add-drop micro-ring resonators have the advantage of more freedom in designing high-extinction-ratio and large-bandwidth modulators without changing the ion doping processes of the chip. Here we design a high-speed silicon modulator based on an add-drop micro-ring resonator with a radius of 20  $\mu\text{m}$ ; it demonstrates high extinction ratio with low reverse bias. How the coupling between the straight waveguide and the ring resonator affects the performances is studied theoretically and it is found that a lower coupling coefficient at drop port leads to a higher extinction ratio but not the best bandwidth. Therefore, a balance should be considered between extinction ratio and bandwidth. According to the optimized result of the parameters the device is fabricated and tested. The spectrum testing indicates that the device can have 12 dB extinction ratio when it is operated at 3 V reverse bias. Furthermore, we have observed 8 Gbps open-eye diagram with only 1.2 V peak-to-peak signal voltage.

**Keywords:** electrode-optical modulator, silicon on insulator, micro-ring resonator, free-carrier dispersion effect

**PACS:** 42.82.-m, 42.79.Hp

**DOI:** 10.7498/aps.62.194210

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60837001, 61021003).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: swchen@semi.ac.cn