

文章编号: 1001-3806(2015)06-0885-04

## 新型绝热微环谐振腔型低功耗硅基调制器的设计

杨真

(华东交通大学 现代教育技术中心, 南昌 330013)

**摘要:** 为了改进绝热微环谐振腔的结构、降低谐振腔腔体损耗, 采用了基于绝热过渡曲线的设计方法, 提出了新型载流子注入/抽取结构, 进行了理论分析和实验验证, 取得了绝热微环谐振腔的谐振峰线宽、消光比及频率响应参量数据, 比较了其与传统微环谐振腔的损耗。结果表明, 使用所设计的外半径为  $2\mu\text{m}$  的谐振腔的谐振峰线宽仅为普通微环谐振腔的 29.5%, 消光比为 13.5dB, 电阻电容限制带宽提高了 4 倍, 10Gbit/s 调制速率下能耗仅为 5.1fJ/bit。这一结果大幅改善了绝热微环谐振腔的频率响应特性, 降低了功耗。对腔形和载流子注入/抽取结构的研究可以进一步改善绝热微环谐振腔的性能, 推动低能耗器件研究的发展。

**关键词:** 光学设计; 硅基调制器; 绝热过渡曲线; 谐振腔

**中图分类号:** TN761

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.06.032

## Design of new type adiabatic micro-ring harmonic cavity low-power silicon modulator

YANG Zhen

(Modern Educational Technology Centre, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** For the purpose of improving the structure of adiabatic micro-ring resonator and reducing the resonator cavity loss, a new carrier injection/extraction structure was proposed based on adiabatic transition curve. After theoretical analysis and experimental verification, the data of resonant full wave at half maximum (FWHM) of the adiabatic micro-ring resonator, extinction ratio and frequency response parameters were obtained and compared with the loss of a traditional micro-ring resonator. The results show that FWHM of the adiabatic ring with outer radius of  $2\mu\text{m}$  is only 29.5% of that of a traditional micro-ring, the constrained bandwidth of resistance and capacitance increases 4 times, extinction ratio is 13.5dB and energy consumption is 5.1fJ/bit under modulation speed of 10Gbit/s. This research is helpful to improve the frequency response and reduce the power consumption of an adiabatic micro-ring resonator significantly. The study on adiabatic transition and carrier injection/extraction structure can further improve the performance of the adiabatic micro-ring, and push the development of low energy consumption research.

**Key words:** optical design; silicon modulator; adiabatic transition curve; resonator

### 引言

近年来, 利用硅的自由载流子等离子色散效应, 通过 P-N 结控制折射率的方式逐步发展, 新的 P-N 结结构也不断被提出, 弥补了硅材料弱电光效应的缺点, 甚至实现了高达 44Gbit/s 的传输速率<sup>[1]</sup>。现在, 硅既是超大规模集成电路 (very large scale integration, VLSI) 成熟的衬底材料, 也是目前最有前景的集成光互连平

台。光网络单元 (optical network unit, ONU) 光模块在每个用户终端都需配备一个, 其包含了光发射机和接收机, 因此通过研究占光发射机能耗很大部分、更低功耗的新型调制器, 对于我国普及光纤入户和节能减排都有着重要的意义<sup>[2]</sup>。谐振腔型方面, 传统只有微盘谐振腔和微环谐振腔两种。微盘谐振腔内部传播回音壁模式, 因此弯曲损耗比微环谐振腔小, 但只能工作在多模状态, 因此自由光谱范围受到损害。并且调制器工作的区域一般要求变化陡峭且单调, 多模谐振峰往往会互相重叠, 不能满足要求。而绝热微环谐振腔的新腔型损耗低于微环谐振腔, 又能保持单模运转, 综合了传统的两种谐振腔型的优点。

硅基调制器是在“绝缘体上硅” (silicon-on-insulator, SOI) 材料上制作的调制器, 具有低成本并与互补

基金项目: 江西省科技厅自然科学基金资助项目 (20122BAB211040)

作者简介: 杨真 (1980-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为光电子技术、计算机应用。

E-mail: yangzhen\_xf@163.com

收稿日期: 2014-09-15; 收到修改稿日期: 2015-01-11

金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 工艺兼容的优点<sup>[3]</sup>。在信息量快速增长的今天,低功耗调制器成为未来通信器件的研究趋势。对腔形和载流子注入/抽取结构的研究可以进一步改善绝热微环谐振腔的性能,推动低功耗器件研究的发展。硅基调制器是光互连和光通信终端的最佳解决方案,成本低,且与 CMOS 工艺兼容,可以光电混合集成。随着通信量的不断增长,低功耗调制器的地位也越发重要,有着迅速商用化的前景。

## 1 低功耗理论研究

一般而言,调制器的能耗可以由下式表示:

$$P = P_{c,s} + P_{c,d} + P_{m,b} + P_{m,d} + P_{m,t} \quad (1)$$

式中,  $P$  表示能耗,  $P_{c,s}$  为驱动电路静态的能耗,  $P_{c,d}$  为驱动电路动态的能耗;  $P_{m,b}$  为施加偏置电压所产生的能耗,反向偏压的漏电流极小,可忽略不计,正向偏压的电流产生的能耗则需要考虑;  $P_{m,d}$  是由调制电压改变时的开关能耗所致;  $P_{m,t}$  为调谐能耗。与调制器的光学和半导体结构相关的能耗为  $P_{m,b}$  和  $P_{m,d}$ , 研究降低功耗主要针对这两项<sup>[4]</sup>。能耗与电容的一次方成正比,而与驱动电压的平方成正比,因此减小能耗的主要方式是降低驱动电压<sup>[5]</sup>。从原理上看,调制的能耗是使载流子耗尽所需要做的功<sup>[6]</sup>,因此在谐振线宽不变的情况下, P-N 结区域越小(调制器尺寸小),能耗也就越低。在保证消光比不降低的情况下降低功耗,就要求谐振峰要细锐<sup>[7]</sup>,具有高精度度  $F$  值,同时谐振峰漂移量对于折射率的变化应更大(耗尽层宽度变化大)。另一方面,过高的  $F$  值会造成高光子寿命,从而降低调制器的带宽<sup>[8]</sup>。实际设计时谐振腔的精细度  $F$  是折衷能耗与频率响应的结果<sup>[9]</sup>。

按照上述关系,整体改善调制器性能的方式主要有 3 种:(1) 在谐振峰宽度不变的情况下降低谐振腔尺寸,这就要求使用新型低损耗谐振腔,因此可以给出一种方案,即需要以降低调制器能耗为最主要手段,而且可实现的最小尺寸受到弯曲损耗和工艺水平的制约;(2) 优化半导体结构,增大耗尽区与光场重叠面积,增大谐振峰漂移量;(3) 优化电学特性,降低电阻电容(resistor capacitor, RC) 常数。

## 2 绝热微环调制器的设计与优化

设计一个微环调制器,需要考虑的组成部分包括:腔型设计、与直波导的传播常数匹配、P-N 结结构、载流子注入/抽取结构以及驱动电压的确定。腔型设计如下:可以选择普通微环谐振腔、微盘谐振腔和绝热微环谐振腔。前两者腔型均为圆形,设计简单;绝热微环

谐振腔有更好的性能,但绝热过渡曲线的设计相对复杂。与直波导的传播常数匹配:从最简单的纵向正规光波导的横向耦合模理论出发,容易得到有传播常数失配的两波导耦合系数<sup>[10]</sup>,可用下式来表示:

$$\begin{cases} P_0(z) = \cos^2(gz)e^{-\alpha z} + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2 \frac{\sin^2(gz)}{g^2} e^{-\alpha z} \\ P_1(z) = \frac{\kappa^2}{g^2} \sin^2(gz)e^{-\alpha z} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $P_0$  和  $P_1$  分别为输入波导、耦合波导的光功率,  $\kappa$  为互耦合系数,  $\alpha$  为损耗系数,  $\Delta\beta$  为传播常数失配,  $g$  为与耦合状态有关的常数。从以上两式可以看出,在传播常数失配的情况下,光功率不能全部耦合到输出波导中,并且会降低耦合系数。在大尺寸谐振腔设计中,相位匹配并不重要,因为大尺寸腔的损耗很小,因此要求的互耦合系数也很小,即使相位不匹配也很容易满足。而在小尺寸器件设计中,应当减小传播常数失配,并使自耦合系数与腔的损耗系数匹配(临界耦合状态),以实现最佳工作状态。

2012 年 12 月,麻省理工学院的 WATTS 提出了一种新腔型——绝热微环谐振腔,在此基础上进行了改进,设计了如图 1a 所示的结构。在直波导与环的耦合区,传播模式为脊型波导横电(transverse electric, TE) 波基模,然后经过过渡区,模式渐变为回音壁 TE 基模,在环的上部为回音壁模式区,是一个半径较小的圆弧<sup>[11]</sup>。光在环中谐振的每一个周期都要经历脊型波导 TE 基模→回音壁 TE 基模→脊型波导 TE 基模的转化。由于有回音壁模式区域的存在,腔损耗(尤其是弯曲损耗)降低。如图 1b 所示,可以看到该结构中的模场分布,在耦合区为椭圆形光斑(脊型波导 TE 基模),在回音壁模式区为瓜子型光斑(回音壁 TE 基模)。更低的腔损耗允许更小尺寸的调制器,对降低调制器的能耗有重要意义。

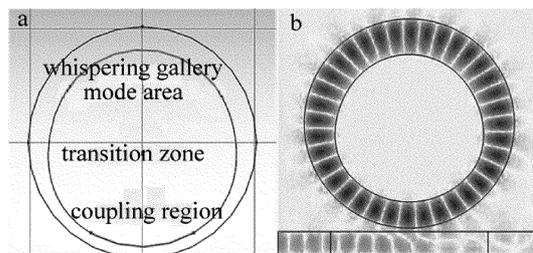


Fig. 1 a—adiabatic micro-ring resonator b—mode distribution of adiabatic micro-ring resonator

该结构的另一个优点是应用性能更好的垂直 P-N 结构,并将掺杂区域全部放在环内,环外不掺杂,有效降低了模式泄漏导致的损耗。传统的侧向 P-N 结构在二氧化硅层上方通过一层轻掺杂的平板硅波导与环区相连。这种结构在小弯曲半径下(例如半径

2μm)会导致可观的弯曲损耗,降低功耗的最重要的方式就是缩小环尺寸,因此传统侧向 P-N 结构难以适应低功耗调制器的要求<sup>[12]</sup>。而图 1b 所示的垂直 P-N 结构,环外不掺杂,且环直接制作在二氧化硅层上,不制作平板波导,因此在小弯曲半径下仍能保持低损耗。另外,回音壁模式不需要内边界的束缚条件,可以直接从环内用掺杂硅与环波导相连而几乎不对导模产生扰动;相比之下,微环谐振腔的导模需要内外边界提供束缚,如果采用这种连接结构会使光场大量泄漏。

### 3 绝热微环腔损耗和垂直 P-N 结低功耗特性

按以上提出的新腔型和新载流子注入结构,给出具体的调制器设计过程,并计算其性能参量。P-N 结的掺杂工艺通常是离子注入,注入浓度在结区内近似按高斯分布,且数值也并不十分准确。工艺上的精度无法满足过于精确的设计参量,因此本文中采用较优的一组通用 P-N 结参量:重掺杂 P<sup>+</sup>, N<sup>+</sup> 浓度为 1 × 10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>;轻掺杂 P, N 浓度为 1 × 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>。结区中线位置为 135nm,波导高度为 240nm。结区中线向一侧偏移,是为了让对折射率调制更明显的 P 区与光场有更大的重叠面积。反偏电压 0.9V 时,耗尽区宽度约为 69.9nm,反偏结电容约 9.6fF;正偏电压 0.9V 时,耗尽区对光场的影响可忽略不计。采用外半径为 2μm 的绝热微环谐振腔,完整腔型见图 2。

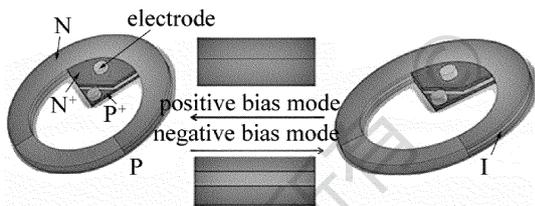


Fig. 2 Structure diagram and sections of adiabatic micro-ring modulator

模拟仿真实验正偏压、反偏压时的模型设置为:分层结构中 P 层、N 层、I 层、P<sup>+</sup> 区、N<sup>+</sup> 区,以及电极如图 2 所示,并分别设置好它们的复介电常数。两图的区别在于耗尽层的宽度不同,对光场分布有不同的影响。耦合距离和直波导宽度按正偏压的临界耦合优化。由

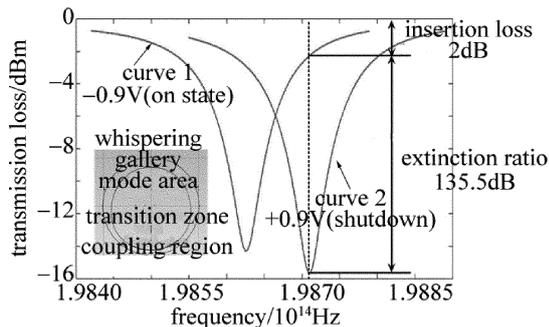


Fig. 3 State diagram of amplitude modulator

于研究关注的重点是低功耗,调制速率并不是优化的重点,因此载流子注入结构只设计了 90°。分别模拟设置正偏压(0 码)、反偏压(1 码)的传输特性,经过仿真测试,可以得到如图 3 所示的软件仿真结果示意图。曲线 1 表示逻辑 1 码,曲线 2 表示逻辑 0 码。从图 3 中可以得到工作波长 1.51μm 处的消光比为 13.5dB,插入损耗为 2dB。模拟其电学特性,可以得到如表 1 所示的结果。

Table 1 Frequency response characteristics of adiabatic micro-ring resonator

	positive bias +0.9V	anti-bias -0.9V
resistance/Ω	> 1 × 10 <sup>10</sup>	561.6
capacitor/fF	—	≈25
leakage current/μA	<1	—
RC limit bandwidth/GHz	—	11.3

其中正偏压电阻是包括耗尽层电阻在内的值,反偏压电阻为载流子注入/抽取结构的电阻(不包括耗尽层)。按这一电阻估算,漏电流本应小到忽略不计的量级,但实际器件中,由于正偏压 0.9V 已经接近内建势 0.96V,所以由于工艺水平的限制,漏电流还是会接近微安量级。RC 常数取反偏状态下的结果计算。

按 10Gbit/s 的调制速率理论计算其能耗,可以表示为:

$$E = \frac{1}{4}CV_{reverse}^2 + \frac{1}{2}V_{forward}I_{forward}t_{bit} = 0.25 \times 25 \times 0.9^2 \text{fJ/bit} + 0.5 \times 1 \times 0.9 \times 10^{-10} \mu\text{J/bit} = 5.0625 \text{fJ/bit} + 0.045 \text{fJ/bit} \approx 5.1 \text{fJ/bit} \quad (3)$$

式中,第 1 行等号右边第 1 项为耗尽 P-N 结需要的开关能量,第 2 项为漏电流的热损耗,其中 C 为电容, V 为电压, I 为电流, t 为时间。可以看出,漏电流与开关能耗相比还是微不足道的。最后,将所有参量列于表 2 中。

Table 2 Parameters calculation/analog value of adiabatic micro-ring resonator

performance	parameter values	frequency response characteristics	parameter values
energy/(fJ · bit <sup>-1</sup> )	5.1	junction capacitance/fF	9.6
drive voltage/V	AC 0.9V	total capacitance/fF	≈25
extinction ratio/dB	13.5	total resistance/Ω	561.6
insertion loss/dB	2	RC constant bandwidth limitations/GHz	11.3
operating wavelength/μm	1.51	photon lifetime limit bandwidth/GHz	129.9
free spectral range/THz	6.92	3dB bandwidth/GHz	11.3
finesse	47	quality factor	1529

仿真实验及理论计算表明,该调制器实现了大消光比下的较低功耗。设计时根据实际需要,还可以用消光比来换取更低的能耗或更大的带宽。值得注意的

是,该调制器的谐振腔实现了高  $F$  值与低品质因数  $Q$  的特性,因此光子寿命几乎不会对带宽造成影响,是小尺寸调制器的一大优势。另外,这一实例只设计了  $90^\circ$  的载流子注入/抽取结构,增大其角度可以进一步提高带宽。

#### 4 结 论

新型绝热微环谐振腔和传统微环谐振腔,前者不但谐振谱线宽更小,利于实现低功耗调制,而且还可使用能耗减小一个数量级的垂直 P-N 结构,可以说是完全超过了传统微环的新腔型。研究了该腔型的线型设计,进一步降低了其腔损耗,并给出了具体的设计方法。该方法也是优化绝热微环谐振腔的系统方法。具体仿真设计了一个绝热微环调制器,并理论计算了其重要参量,实现了高消光比下极低的能耗。

#### 参 考 文 献

- [1] ZHU M X. MOS capacitive silicon electro-optic modulator high k gate dielectric layer research and design [D]. Wuhan: Huazhong University of Science Technology, 2009:8-10(in Chinese).
- [2] REED G T, MASHANOVICH G, GARDE F Y, *et al.* Silicon optical modulators[J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 518-526.
- [3] DONG P, CHEN L, XIE Ch J, *et al.* 50Gb/s silicon quadrature phase-shift keying modulator[J]. Optics Express, 2012, 20(19): 21181-21186.
- [4] WATTS M R, ZORTMAN W A, TROTTER D C, *et al.* Vertical junction silicon microdisk modulators and switches[J]. Optics Express, 2011, 19(22): 21989-22003.
- [5] ZHAO Y, MA K Zh, YANG D Ch, *et al.* Research of vernier effect of ring resonator in sensor fields [J]. Laser Technology, 2014, 38(3): 293-296(in Chinese).
- [6] CHEN K, ZHU D X, ZHANG P C. Mode analysis of laser resonator based on finite element matrix [J]. Laser Technology, 2014, 38(3): 352-356(in Chinese).
- [7] DONG P, CHEN L, CHEN Y K, *et al.* High-speed low-voltage single-drive push-pull silicon Mach-Zehnder modulators[J]. Optics Express, 2012, 20(6):6163-6169.
- [8] YI H X, LONG Q F, TAN W, *et al.* Demonstration of low power penalty of silicon Mach-Zehnder modulator in long-haul transmission [J]. Optics Express, 2012, 20(25): 27562-27568.
- [9] XIAO X, LI X Y, XU H, *et al.* 44Gb/s silicon micro-ring modulators based on zigzag PN junctions[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(19): 1712-1714.
- [10] DING J F, CHEN H T, YANG L, *et al.* Ultra-low-power carrier-depletion Mach-Zehnder silicon optical modulator[J]. Optics Express, 2012, 20(7):7081-7087.
- [11] BIBERMAN A, TIMURDOAGN E, ZORTMAN W A, *et al.* Adiabatic microring modulators [J]. Optics Express, 2012, 20(28): 29223-29236.
- [12] ROSENBERG J C, GREEN W M J, ASSEFA S, *et al.* A 25Gbps silicon micro-ring modulator based on an interleaved junction [J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26411-26423.