

全硅基电光调制器研究动向和发展趋势

李智勇 徐浩 肖希 Nemkova Anastasia 余金中 俞育德

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

摘要 硅光子学在近几年迅猛发展, 各国重要的研究机构和产业部门纷纷加入竞争, 不断刷新各种器件的性能指标记录。全硅基电光调制器作为该领域中极其重要的研究方向之一, 受到国内外同行的广泛关注。随着全硅基电光调制器研究工作的积累和深入, 高速率(大于等于 50 Gbit/s)、低功耗(小于等于 40 fJ/bit)和小尺寸(小于等于 100 μm^2)等关键性能逐步提升。目前, 调制速率的最新研究结果已突破了 60 Gbit/s 并向更高目标迈进, 未来在极低功耗和规模集成等方面还将出现较大突破, 适应巨容量光通信、高密度光互连、大数据光传感等应用技术的需要。

关键词 硅光子学; 电光调制器; 高速率; 低功耗; 小尺寸

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.110009

Recent Progress on Research and Development of Electro-optical Modulators on Silicon Substrates

Li Zhiyong Xu Hao Xiao Xi Nemkova Anastasia Yu Jinzhong Yu Yude

National Key Laboratory for Optoelectronic Integration, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract Due to its great achievements over the last few years, silicon photonics is now a focused topic in many conferences and forums. Among the key photonic blocks, an optical modulator based on a silicon substrate is one of the most attractive issues for scientists and engineers. According to the reported state-of-art experimental results, silicon based optical modulators have perfect operation speed (no less than 50 Gbit/s), low power consumption (no more than 40 fJ/bit) and small footprint (no more than 100 μm^2). Till now, the most recent tested data rate reaches 60 Gbit/s. More research and development focus on higher energy efficiency and higher integration density, which are required by optical communication, optical interconnect and optical sensing, to build information infrastructures with ultra-large bandwidth, much high density and very-big data.

Key words silicon photonics; optical modulator; high-speed; low power consumption; small footprint

OCIS codes 250.5300; 250.7360; 130.4110; 230.2090; 130.3120

1 引言

硅光子学是当前半导体光子与光电子集成领域的研究热点, 其主要目标是研制出经济、高效的硅基光波导集成器件, 可应用于光信息处理芯片、光通信系统和光学传感网络等关系国家安全战略和科技发展水平的重要领域^[1-3]。基于硅材料的光波导器件不仅具有与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容、低成本、高质量的经济优势, 还拥有在光通信波段透明、带宽潜力大、集成效果好等性能优点, 因而成为开发光电集成芯片最有吸引力的研究方向之一^[1]。CMOS工艺的不断进步为微电子产业的发展提供了强大的技术支持, 也为硅基光波导集成器件的实用化提供了必要的平台保障。CMOS工艺不仅可用于研制各种无源光波导器件, 比如全光开关^[4]、滤波器^[5]、模式控制器^[6]、干涉器^[7]、信号格式变换器^[8]等, 而且有助于实现有源光子

收稿日期: 2014-04-27; 收到修改稿日期: 2014-08-18; 网络出版日期: 2014-10-21

基金项目: 国家 863 计划(2012AA012202)、国家 973 计划(2011CB301701)、国家自然科学基金(61275065, 61107048, 11350110205)、中国博士后科学基金(Y1T1060000)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KGCX2-EW-102)、中国科学院外籍青年科学家计划(2011Y1GB07)

作者简介: 李智勇(1978—), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事硅光子学和 CMOS 光电子集成技术及其应用的研究。

E-mail: lizhy@semi.ac.cn

器件与集成电路在设计、加工、测试及应用等方面的全方位融合。近几年,应变硅、高介电常数材料、金属硅化物等已实现先进 CMOS 工艺,这些微电子材料及其新型工艺有利于拓展硅光子学器件的发展空间,因此硅基光电子芯片的研制将大有可为。采用 CMOS 工艺或兼容工艺,在硅衬底上制作光波导器件已成为新一代光电子集成技术的优选方案。

全硅基电光调制器是实现硅基光电子集成及其应用的基础之一。采用 CMOS 工艺制作高速率、低功耗、小尺寸的全硅基电光调制器已成为器件研究与集成应用的重要发展方向。经过多年探索,全硅基电光调制器的性能呈指数跃升。Intel 公司在 2004 年《自然》杂志上报道了一种达到兆赫兹速率的金属氧化物半导体(MOS)型全硅基电光调制器。时隔三年半,Intel 公司又报道了传输速率高达 40 Gbit/s 的绝缘体上硅(SOI)电光调制器,该调制器引入了反向 PN 结电学结构,使调制速率比先前结构提高了一个数量级,基本达到了硅光子芯片仅用于单个信息处理模块时的速率要求。Luxtera 公司在当年展示了全硅基电光调制器用于短距离连接的有源光缆(AOC),4 根光纤并行收发模块的速率可达 40 Gbit/s。2009 年,Intel 公司宣布将全硅基电光调制器应用于芯片间数据高速传输的光互连技术(Light peak),发布了第一款传输速率高达 10 Gb/s 的光互连芯片,并展示了应用于个人电脑(PC)上的样品,与新一代最高传输率为 5~10 Gb/s 的电学 USB 3.0 技术相比极具发展潜力^[4]。该技术被认为是未来数据互连的发展方向,并被纳入到新型数据传输协议(Thunderbolt),作为 Thunderbolt 的光学实现方式。尽管 IBM 公司、Samsung 公司等技术先进机构提出并验证了全硅基电光调制器应用于计算机芯片内互连的可能性,但是作为一种潜在技术,已有器件仍然面临功耗高、集成度低等现实的性能问题^[5],需要继续攻关解决。

为实现探索创新,国内的各研究单位,如浙江大学、北京大学、上海交通大学和中国科学院属研究所等,也纷纷开展了一系列具有特色的工作^[6-9];比如提出了新颖结构,实现了高速率器件特性等,并逐步接近国外同行的研究水平。其中,中国科学院半导体研究所(IS-CAS)的研究团队成功研制了采用新型设计和结构的全硅基电光调制器^[9],器件的工作速率自 2011 年达到国际同行水平的 40 Gbit/s 后继续提高,近期已超越 60 Gbit/s,延续了性能提升的增长趋势。

本文概括了最近 2 年全硅基电光调制器的重要工作及国内外的发展趋势,从高速率、低功耗、密集成等角度分析了主要的工作进展和研究思路,同时也简要介绍了笔者所在研究团队近期在此方向上的研究成果。

2 大带宽机理实现高速率调制

为了适应通信系统带宽飞速发展的需要,全硅基电光调制器的工作速率目标也越来越高。从 100 Mbit/s 开始,先后达到 1 Gbit/s、10 Gbit/s、25 Gbit/s 和 40 Gbit/s,电光响应的 3 dB 小信号带宽也从 100 MHz 逐步提高到 30 GHz 以上。自 2012 年起,研究者们纷纷将全硅基电光调制器的工作目标指向大于 40 Gbit/s 的更高调制速率^[10-12],如表 1 所示。其中,英国 Surrey 大学的 D.J.Thomson 等研究人员率先报道了 50 Gbit/s 的实验结果,通过采用与脊形波导侧壁共面的 PN 结使得器件在高速率调制时的消光比(ER)约为 3.1 dB^[10]。随后,Alcatel-Lucent 公司的 Po Dong 等报道的消光比提高到 4.7 dB^[11]。新加坡的 IME-ASTAR 的多位研究者也报道了相关结果,在 5 V 反向偏置电压下的消光比达到 5.56 dB^[12],而无偏置条件下的消光比也有 3.4 dB。通过结构设计的创新和改进,中国科学院半导体研究所的肖希博士等研究人员,利用国内的微电子加工工厂也实现了 50 Gbit/s 高速率光调制,其消光比为报道结果中的最高值(7.5 dB),并且该类型器件的工作速率首次达到了 60 Gbit/s^[9],实验测得该速率下的消光比达到 3.6 dB 以上。

全硅基电光调制器要达到 50 Gbit/s 的工作速率,器件的小信号 3 dB 带宽至少需要 25 GHz(按照数字信号的基频考虑),以保证良好的调制效果。因此,研究者们对全硅基电光调制器的大带宽工作机理进行了各种研究。全硅基电光调制器实现高速率工作的器件结构因素主要包括:P 型和 N 型硅掺杂区域的分布特征、接触区和电极的微波阻抗特性等。其中,D.J.Thomson 为了获得高速率调制,采用了与硅光波导中心偏离较多的 PN 结^[10],使得全硅基电光调制器有源区的电容特性得到了有效改善,有利于提高电光调制的小信号 3 dB 带宽及其在频带范围内的平坦性;但是调制效率($V_n L_n$, 约为 2.8 V·cm)由于 PN 结面偏离光场中心较多而有所损失,光器件插入损耗(IL, 约为 7.4 dB)也比较大,对于改善高速调制工作时的消光比等特性非常不利。

表 1 工作速率为 50 Gbit/s 及以上的全硅基电光调制器比较

Table 1 A comparison of silicon based optical modulators with an operation speed of no less than 50 Gbit/s

Years	Facilities	Data Rate /(Gbit/s)	ER /dB	$V_{\pi}L_{\pi}/(V \cdot \text{cm})$	IL /dB	V_{bias}/V	References
2012	Univ. of Surrey	50	3.1	2.8	7.4	-4	[10]
2012	Alcatel-Lucent	50	4.7	2.4	2.4	-6	[11]
2013	IME-ASTAR	50.1	5.56	2.67	4.16	-5	[12]
2013	IME-ASTAR	50	3.4	2.43	1.6	0	[13]
2013	PETRA/AIST/PECST	50	4.58	0.28	5.2	0	[14]
2013	IS-CAS	50	7.5	2.05	6.5	-5	[9]
2013	IS-CAS	60	3.6	2.05	3.5	-5	[9]

针对上述问题,可在器件设计过程中预先考虑电光调制效率的损失和调制过程附加损耗变化带来的影响。模拟分析的结果显示,PN结的位置(如图1所示)优化后可使得小信号电光响应带宽达到30 GHz^[9]。这样的设计使得全硅基电光调制器在50 Gbit/s速率下仍然可以比较有效地实现微波信号与光波的相互作用,消光比得以显著提高,如图2所示^[9]。在进行电极特性优化后,重点考虑高速信号的匹配问题,通过结构设计在保持电光调制效率的同时,全硅基电光调制器的小信号3 dB带宽可提高到40 GHz以上,并有效地增强了高速电信号与光载波的相互作用,对于实现速率60 Gbit/s以上的极高速调制有重要意义。

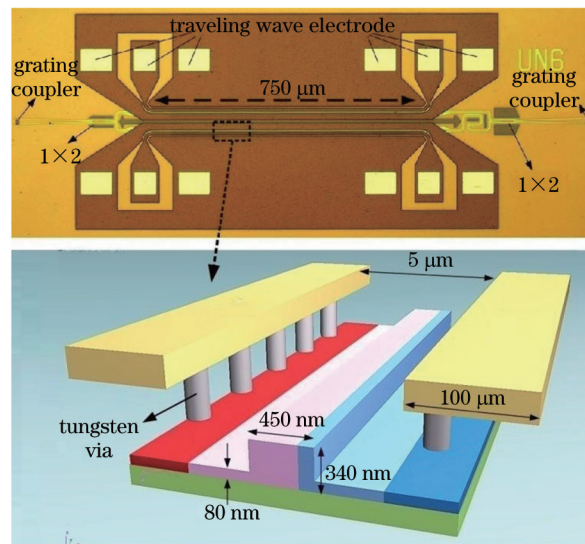


图 1 大带宽高速率全硅基电光调制器的显微照片和结构设计

Fig.1 A microscope image and a diagram of a broad band high speed electro-optical modulator on a silicon substrate

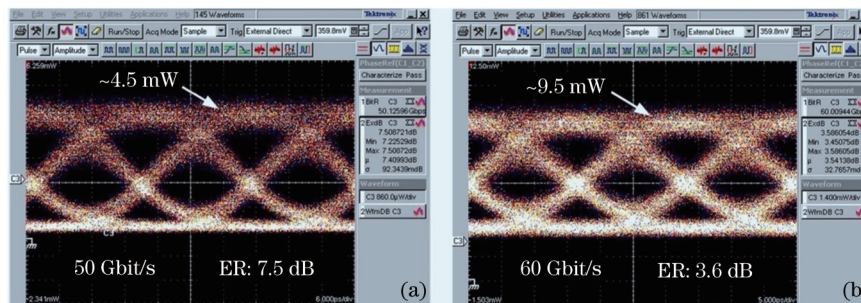


图 2 全硅基电光调制器在工作速率为 50~60 Gbit/s 时输出的眼图

Fig.2 Eye diagrams at data rates of 50~60 Gbit/s from a silicon based optical modulator

3 高效率结构降低功耗

全硅基电光调制器的工作效率和驱动功耗问题,也是其重要的器件特性。为了实现大带宽和高速率,

往往降低效率以求速度。然而在实际应用环境中,尤其是对于高速率光信号连接而言,效率和功耗有着非常重要的价值。

从设计原理本身出发,增大器件的有源区长度可以有效地降低全硅基电光调制器的偏置电压和峰-峰电压,有助于减小模块或系统的整体功耗,如表2所示。采用马赫-曾德尔干涉(MZI)型光学结构时,全硅基电光调制器的功耗通常约为 $1 \text{ pJ/bit}^{[15]}$ 。通过改进PN结的界面形状和位置,可以较大地提高器件的工作效率,由于所需的微波信号幅度更小(小于 $3 \text{ V}^{[13,15-17]}$),功耗较低($450\sim 640 \text{ fJ/bit}$)。中国科学院半导体研究所的研究人员通过在偏置的PN结中引入本征区,将MZI型全硅基电光调制器的驱动电压峰-峰值降低到 0.36 V ,功耗水平仅有 $32.4 \text{ fJ/bit}^{[16]}$,非常接近微环谐振腔(MRR)型全硅基电光调制器(约 $10 \text{ fJ/bit}^{[18]}$)。

表2 低功耗全硅基电光调制器的比较

Table 2 A comparison of low power consumption silicon based modulators

Years	Facilities	Data rate / (Gbit/s)	Power cost / (fJ/bit)	V_{bias}/V	V_{pp}/V	IL / dB	Optics	Length / mm	References
2013	IME-ASTAR	50	450	0	1.5	1.6	MZI	3	[13]
2014	Univ. of Delaware	40	640	0	1.6	3.6	MZI	3	[15]
2013	IS-CAS	40	32.4	0	0.36	4.5	MZI	2	[16]
2012	IBM	40	471	-	1.6	3	MRR	-	[17]
2011	Oracle	25	7	0	1	-	MRR	-	[18]

4 小尺寸器件提高集成密度

对于光电子集成而言,全硅基电光调制器不仅要提高调制速率、降低功耗,还需要缩小器件尺寸,增大片上集成的空间自由度。为此,全硅基电光调制器中的电学结构如PN结,需要充分的优化和改造,例如引入交错型PN结^[9,17,19],如图3所示^[19],可有效地降低工作电压($1\sim 3 \text{ V}$)、缩短MZI型全硅基电光调制器的有源区长度($0.5\sim 1 \text{ mm}$),并确保小信号带宽足够大(大于 40 GHz)。最近,韩国的研究人员Kim等采用波导顶部重掺杂接触结构(图4),成功地将MZI型全硅基电光调制器的有源区长度缩减至 $0.1 \text{ mm}^{[20]}$,调制效率约为 $0.6 \text{ V}\cdot\text{cm}$, 2 V 反偏置条件下的 3 dB 带宽接近 50 GHz , 2.5 V 峰-峰电压可实现 50 Gbit/s 速率的光调制输出,消光比约为 5.3 dB ,这为MZI型结构的改进提供了一个新的设计思路。

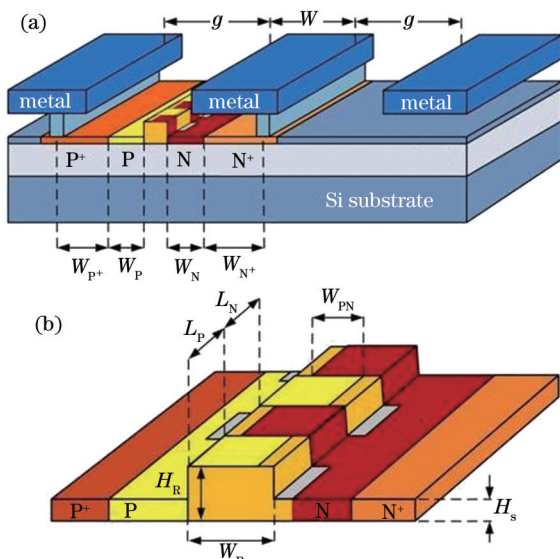


图3 新型全硅基电光调制器中的(a)行波电极和(b)交错型PN结

Fig.3 Novel designs of silicon based optical modulators.

(a) Travelling electrodes; (b) interleaved PN junctions

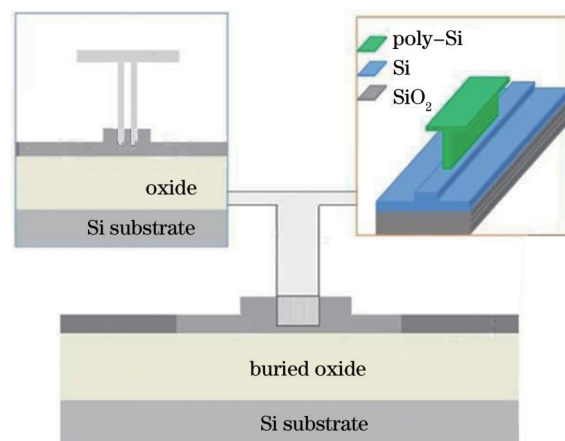


图4 采用波导顶部重掺杂接触结构的全硅基电光调制器

Fig.4 A silicon based optical modulator with heavily-doped contacts on top of waveguides

光学结构方面可利用微环、微盘等谐振腔结构(小于 $100 \mu\text{m}^2$),或光子晶体波导的禁带特性(图5)^[21],但这些器件都具有波长敏感特性,需要较精确的波长对准和温度控制。其他光学结构如非对称MZI和迈克耳孙干涉仪(MI)^[22],可有效地改善器件尺寸,但也面临波长相关特性或微波匹配设计^[19]等问题。

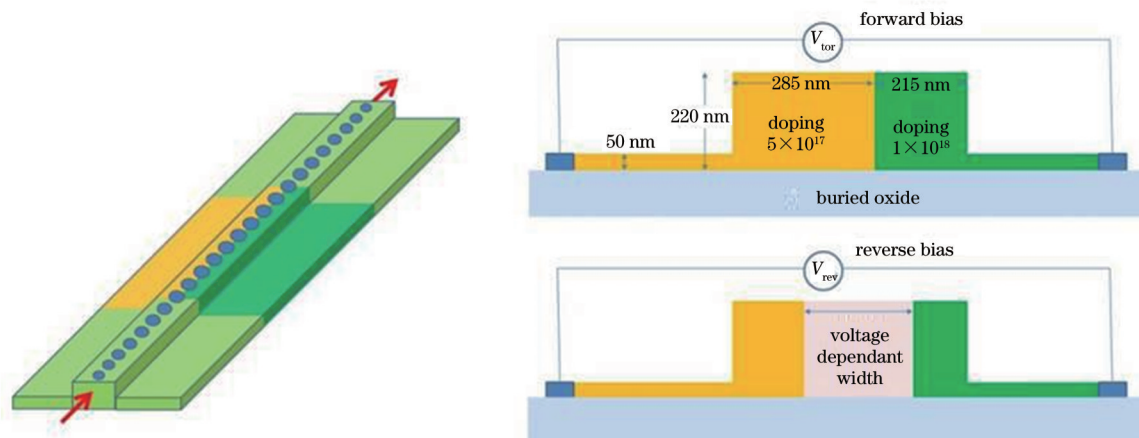


图5 基于光子晶体波导的全硅基电光调制器

Fig.5 Photonic crystal waveguide based electro-optical modulators on silicon substrates

在片上光子集成系统中,全硅基电光调制器的几何尺寸仍需大幅减小,才能满足高密度集成的发展需要。然而,在硅基衬底材料如绝缘体硅(SOI)中,自由载流子等离子色散效应(FC-PDE)等可用于光调制的物理效应有限,光电相互作用比较小。这就需要考虑硅化物、锗^[23]、石墨烯^[24]和有机聚合物^[25-27]等材料,并且必须与微电子集成技术中的设计原理和工艺方法相兼容。目前来看,在硅基衬底材料中引入新的功能材料(比如石墨烯或锗),还面临较大的技术障碍(大部分光电材料在CMOS工艺未达到要求前很难进入微电子工厂的制造环节),有待微电子集成技术的进一步发展,形成足够的技术支撑,新型材料在全硅基电光调制器中的应用潜力才有充分发挥的空间。现阶段的全硅基电光调制器仍需关注以硅衬底为主,包含工艺允许的常规材料,如金属氧化物、硅化物、多晶硅、非晶锗等,并深入研究在微电子工艺环境中可以采用的全硅技术,尤其是硅材料自身仍有一些需要深度研究的物理机理,如极重掺杂条件下电子与空穴的散射、晶格应变致电光效应、纳米结构的表面复合和超薄层介质的量子隧穿等。

5 结 论

全硅基电光调制器已经取得了重要的技术突破,部分性能指标接近应用水平。一方面,与硅光子学相关的产业技术正在蓬勃兴起,必将带动全硅基电光调制器的实用化发展,使其融入新型光通信、光互连、光传感技术,比如相干光通信系统中的收发模块等。另一方面,对全硅基电光调制器的工作机理开展进一步深入的研究,有助于解决现有器件在高速调制的损耗代价、电光吸收引起的信噪劣化、器件结构的微缩化等基础科学问题,为与CMOS工艺兼容的大容量、低功耗、高密度的光子信息芯片、系统和网络提供技术支撑。继续开展对全硅基电光调制器的研究,需要对应用领域的关键问题保持关注,使我国在该研究方向上继续紧跟国际发展潮流,并推动硅光子学器件和硅基光电子集成技术走向应用。

参 考 文 献

- 1 Yu Jinzhong. Advances and tendency of silicon photonics [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(12): 68-71.
余金中. 硅光子学的研究和发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(12): 68-71.
- 2 Qiu Yuanwu. Silicon photonics [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(9): 36-41.
邱元武. 硅光子学[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(9): 36-41.
- 3 Zhou Zhiping, Gao Dingshan, Wang Yi, *et al.*. Progress on si-based optoelectronic devices and integration [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(2): 31-38.
周治平, 郜定山, 汪毅, 等. 硅基集成光电子器件的新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(2): 31-38.
- 4 Liu Yi, Tong Xiaogang, Yu Jinlong, *et al.*. All-optical switching in silicon-on-insulator serially coupled double-ring

- resonator based on thermal nonlinear effect [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205006.
- 刘毅, 仝晓刚, 于晋龙, 等. 基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205006.
- 5 Chen Zhiyong, Hao Xiaolong, Zheng Yanmin, *et al.*. Large-angle polarization-independent broadband filters based on silicon photonic crystal slabs [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0305002.
- 陈志勇, 郝小龙, 郑彦敏, 等. 大角度偏振无关硅膜光子晶体宽带滤波器[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0305002.
- 6 Cui Naidi, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, *et al.*. Two-stage photonic crystal beam compressor based on silicon nanowire waveguide [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0123004.
- 崔乃迪, 梁静秋, 梁中翥, 等. 基于硅纳米线波导的两级光子晶体缩束器[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0123004.
- 7 Wang Zhi, Zhang Limei, Chen Yingchuan, *et al.*. Two mode interference for nano SOI waveguide [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0705003.
- 王智, 张丽梅, 陈颖川, 等. 硅基纳米波导的双模干涉[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0705003.
- 8 Ren Yan, Song Muping. Optical NRZ-to-RZ modulation format conversion based on cross-phase modulation effects in silicon micro-ring resonator [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706002.
- 任艳, 宋牟平. 基于硅基微环谐振器交叉相位调制效应的非归零信号到归零信号光调制格式转换[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706002.
- 9 X Xiao, H Xu, X Li, *et al.*. High-speed, low-loss silicon Mach-Zehnder modulators with doping optimization [J]. Opt Express, 2013, 21(4): 4116-4125.
- 10 D J Thomson, F Y Gardes, J M Fedeli, *et al.*. 50-Gb/s silicon optical modulator [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(4): 234-236.
- 11 Po Dong, Long Chen, Young-kai Chen. High-speed low-voltage single-drive push-pull silicon Mach-Zehnder modulators [J]. Opt Express, 2012, 20(6): 6163-6169.
- 12 X Tu, T Liow, J Song, *et al.*. 50 Gb/s silicon optical modulator with traveling-wave electrodes [J]. Opt Express, 2013, 21(10): 12776-12782.
- 13 M Streshinsky, R Ding, Y Liu, *et al.*. Low power 50 Gb/s silicon traveling wave Mach-Zehnder modulator near 1300 nm [J]. Opt Express, 2013, 21(25): 30350-30357.
- 14 T Baba, S Akiyama, M Imai, *et al.*. 50 Gb/s ring-resonator-based silicon modulator [J]. Opt Express, 2013, 21(10): 11869-11876.
- 15 Ran Ding, Yang Liu, Qi Li, *et al.*. Design and characterization of a 30 GHz bandwidth low-power silicon traveling-wave modulator [J]. Opt Commun, 2014, 321: 124-133.
- 16 Jianfeng Ding, Ruiqiang Ji, Lei Zhang, *et al.*. Electro-optical response analysis of a 40 Gb/s silicon Mach-Zehnder optical modulator [J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(14): 2434-2440.
- 17 J C Rosenberg, W M J Green, S Assefa, *et al.*. A 25 Gb/s silicon microring modulator based on an interleaved junction [J]. Opt Express, 2012, 20(24): 26411-26423.
- 18 Guoliang Li, Xueze Zheng, Jin Yao, *et al.*. 25Gb/s 1V-driving CMOS ring modulator with integrated thermal tuning [J]. Opt Express, 2011, 19(21): 20435-20443.
- 19 H Xu, X Y Li, X Xiao, *et al.*. Demonstration and characterization of high-speed silicon depletion-mode Mach-Zehnder modulators [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2014, 20(4): 3400110.
- 20 G Kim, J Park, I Kim, *et al.*. Compact-sized high-modulation-efficiency silicon Mach-Zehnder modulator based on a vertically dipped depletion junction phase shifter for chip-level integration [J]. Opt Lett, 2014, 39(8): 2310-2313.
- 21 J Hendrickson, R Soref, J Sweet, *et al.*. Ultrasensitive silicon photonic-crystal nanobeam electro-optical modulator: design and simulation [J]. Opt Express, 2014, 22(3): 3271-3283.
- 22 Xianyao Li, Xi Xiao, Hao Xu, *et al.*. Highly efficient silicon Michelson interferometer modulators [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(5): 407-409.
- 23 L Yang, T Hu, R Hao, *et al.*. Low-chirp high-extinction-ratio modulator based on graphene-silicon waveguide [J]. Opt Lett, 2013, 38(14): 2512-2515.
- 24 R Audet, E Edwards, K Balam, *et al.*. Surface-normal Ge/SiGe asymmetric Fabry-Perot optical modulators fabricated on silicon substrates [J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(24): 3995-4003.
- 25 Mu Xu, Fei Li, Tao Wang, *et al.*. Design of an electro-optic modulator based on a silicon-plasmonic hybrid phase shifter [J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(8): 1170-1177.

-
- 26 Palmer R, Alloatti L, Korn D, *et al.*. Low power Mach-Zehnder modulator in silicon-organic hybrid technology [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(13): 1226-1229.
- 27 X Zhang, A Hosseini, S Chakravarty, *et al.*. Wide optical spectrum range, subvolt, compact modulator based on an electro-optic polymer refilled silicon slot photonic crystal waveguide [J]. Opt Lett, 2013, 38(22): 4931-4934.