

载流子色散型硅基 CMOS 光子器件*

赵勇, 江晓清[†], 杨建义, 王明华

(浙江大学 信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要: 为了实现硅基单片光电子集成器件的实用化, 介绍了采用 P-I-N、双极型场效应晶体管、金属氧化物半导体和 PN 结结构的载流子色散型硅基 CMOS 光子器件的发展状况和特点, 并汇报了硅基 CMOS 光子器件的设计和制作方面的工作. 利用商业的 CMOS 工艺线制作的器件获得了较好的结果, 光调制器消光比约 18 dB, 1×2 光开关消光比约 21 dB, 谐振环的消光比 8~12 dB. 采用 CMOS 技术研制硅基光子器件, 将能使集成光子学的发展上一个新的台阶.

关键词: 集成光学; 硅基; 载流子色散效应; CMOS 光子器件

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)10-2485-6

0 引言

基于硅材料的微电子技术已对人类社会的进步发挥了巨大的作用, 现代信息数据的海量增长、带有多核处理器的高性能计算机的出现, 对信息传输等技术提出了更高、更快的要求, 集成光子技术被认为是解决途径之一. 集成光子技术研究已经历三十余年, 由于技术和成本的因素, 直接在光子器件层面上的集成代替集成微电子器件实现全光的信息处理, 一直没有实现. 然而, 2004 年 Intel 公司基于硅的 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) 技术研制的高速硅电光调制器以及近年来的硅基 Raman 激光器、混合集成激光器和高速探测器, 将现有成熟的微电子技术和光子技术结合, 使得硅基 CMOS 光子学的发展上了一个新的台阶.

载流子色散效应指的是载流子的注入或抽取导致的半导体中自由载流子的变化引起折射率的变化, 该效应已广泛应用于 III-V 族半导体光子器件. 由于晶体结构的对称性, 硅材料没有一阶线性电光效应 (Pockles 效应), 但研究表明, 硅材料的载流子色散效应也相当显著, 因此当前利用硅基材料研制光子器件的主要电光效应. 载流子色散效应具有高速、偏振不敏感、折射率变化大等优势, 而且在制作上它与成熟的硅 CMOS 工艺兼容, 易与微电子器件集成, 可能实现大批量、低成本的商业生产.

1 载流子色散型硅基光子器件的发展状况

1983 年, 瑞典皇家工学院的 M. Willander 设计

实验验证硅光波导中的载流子效应^[1], 通过理论上的分析和实验, 指出介电常量的虚部与载流子浓度呈线性函数关系. 随后几年, R. A Soerf 及其合作者在载流子色散效应方面做出了极大的贡献^[2-4], 他们设计、制作出一系列基于载流子色散效应的硅光波导器件, 并总结了硅光波导器件中, 折射率和吸收系数的变化跟载流子浓度的变化之间的关系式. R. A Soerf 及其合作者还提出了大截面硅光波导器件的单模条件^[5]. 国内有研究人员利用有限差分方法 (Finite Difference Method, FDM) 分析了大截面绝缘层上硅 (Silicon-on-insulator, SOI) 脊型波导的单模条件^[6]. S. P Chan 等人提出了小截面硅光波导器件的单模条件^[7]. 最早的硅光子器件的设计是基于硅-掺杂的衬底硅, 光场限制差、传输损耗较大. 目前, SOI 波导结构成为主流, 因为 SOI 波导结构能更好的限制光场.

近 20 年来, 研究人员在 P-I-N、双极型场效应晶体管 (Bipolar Mode Field Effect Transistor, BMFET)、金属氧化物半导体 (Metal Oxide Semiconductor, MOS) 和 PN 结等结构的理论研究、器件设计与制作上取得了一系列的成就和进展.

1.1 P-I-N 结构光子器件

P-I-N 结构光调制器和光开关是研究最为广泛的载流子色散型硅基光子器件, 其典型结构见图 1. 其工作原理是重掺杂的 P 区和 N 区间的电流注入会改变 I 区 (本征区) 的自由载流子浓度, 从而改变 I 区的有效折射率, 使得光相位受到调制. 电流注入 P-I-N 结构光子器件有调制效率高、结构紧凑的优势; 缺点是由于存在载流子的产生与复合, 使得调制速度或开关速度受到限制, 其吸收损耗也是不可忽视的. 在功能器件实现上, 有马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zender-Interferometer, MZI)、法布里-珀罗

* 国家重大基础研究发展计划项目 (2007CB613405) 资助

[†] Tel: 0571-87952867

Email: iseejq@zju.edu.cn

收稿日期: 2008-12-26

修回日期: 2008-12-28

腔(Fabry-Perot Cavity)、微环(Micro-Ring)、X 结、Y 分叉和布喇格反射器(Bragg Reflector)等光学结构^[4,8-12]。

1987 年, J. P. Lorenzo 和 R. A. Soerf 首次报道了一种基于 P-I-N 结构的 2×2 硅光开关^[4], 该器件工作于 $1.3 \mu\text{m}$ 波长, 证实了利用成熟的硅技术实现单片光电子集成器件的可能性。

1991 年, IBM 报道了基于 MZI 结构的调制器^[9], 在注入载流子浓度为 $6.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时, 响应时间小于 50 ns , 调制深度 -4.9 dB 。该器件采用的是纵向注入方式, 材料制作及器件制作工艺过程较为复杂。

1994 年, 刘育梁、刘恩科等人首次设计制作出基于 P-I-N 结构的 1×2 Y 分叉数字光波导开关^[10]。注入电流为 290 mA 时, 消光比达 22.3 dB ; 测量到的开关时间低于 0.2 ps 。该器件也采用的是纵向注入方式, 同样面临材料制作及器件制作工艺过程较为复杂的问题。

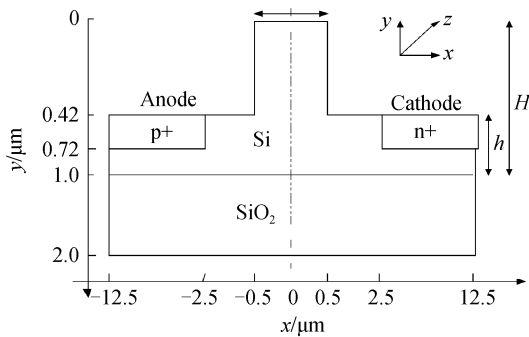


图 1 P-I-N 结构
Fig. 1 Structure of P-I-N

一种基于布喇格反射结构的调制器在 1994 年被报道^[12], 该器件采用横向注入, 利用耗尽区和非耗尽区的折射率差形成布喇格反射, 耗尽区和非耗尽区的折射率差可达 0.005 。器件长度 $300 \mu\text{m}$, 5 V 偏压下的调制深度约 40% 。

2000 年, Intel 宣称可用与 CMOS 兼容的工艺制作的器件见诸报道^[13], 将光子器件和电子器件集成在同一硅芯片上的探索之路又前进了一大步。2005 年,《自然》杂志上刊载了一篇基于微环结构的微米尺度的硅光电调制器^[14], 通过对有效折射率进行调谐, 可调整谐振波长, 从而对传输信号进行调制, 其原理见图 2。该调制器制作于 SOI 材料上, 谐振环直径 $12 \mu\text{m}$, 掺杂区离谐振环约 $1 \mu\text{m}$ 。由于微环、直波导的宽度都在几百纳米, 微环跟直波导的距离也在几百纳米, 器件的尺寸大大缩小。经过编码及电学上的处理, 该调制器的速度可达 18 Gbps ^[15]。

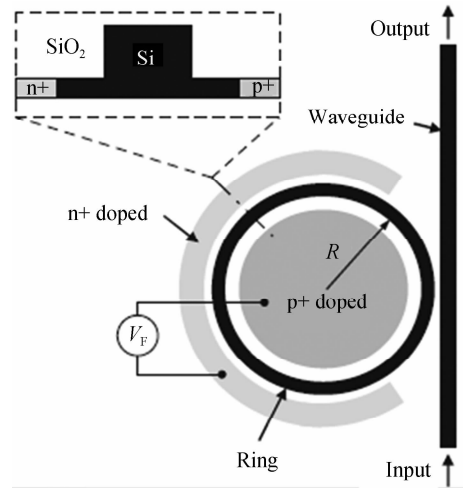


图 2 基于微环振荡结构的调制器原理
Fig. 2 The schematic of the modulator based on Micro-Ring

2008 年, MIT 的 Gui-Rong Zhou 等人, 对基于载流子注入效应的 Mach-Zender 硅光调制器进行了系统研究^[16]。研究指出掺杂浓度会影响载流子寿命的变化, 载流子寿命对调制器性能的影响也很大, 调制效率 $V_{\pi}L_{\pi}$ 的值可低至 $0.24 \text{ V} \cdot \text{mm}$ 。

1.2 BMFET 结构光子器件

与传统的 P-I-N 结构相比, BMFET 结构能改善开关特性, 驱动电流也更小。基于 BMFET 结构的器件可以自由载流子吸收调制和相位调制两种方式工作, 典型 BMFET 结构见图 3。意大利那不勒斯大学的一个研究组对 BMFET 结构进行了原理上的研究, 提出基于 BMFET 结构的光调制器, 做了软件仿真, 设计并制作了采用该结构的光调制器^[17-18]。与传统的 P-I-N 结构器件相比, 他们提出的器件在开关时间和注入电流密度上具有明显的优势; 每伏电压每毫米长度获得的相位变化也更大, 可达 $215^{\circ}/(\text{V} \cdot \text{mm})$ 。由于第三端的存在, 这种结构的器件的驱动方式跟 P-I-N 结构是不同的, 加电压于控制端可以方便地移动注入光通道的等离子体(光通道中的等离子体即自由载流子总量是固定的), 由于自由载流子的漂移要比注入快, 从而可获得更短的开关时间。但是 BMFET 结构器件的缺点也是很明显的,

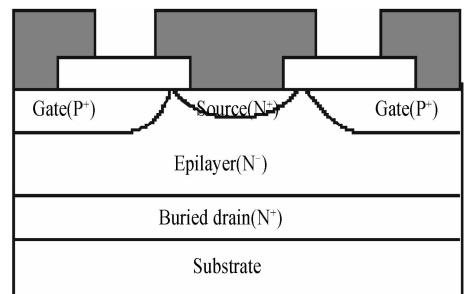


图 3 BMFET 结构
Fig. 3 Structure of BMFET

结构复杂,工艺实现较困难.热效应显著,用相位调制实现光调制时热效应引起的折射率变化会部分抵消载流子变化引起的折射率变化.

1.3 MOS 结构光子器件

MOS 电容的充放电可对电荷密度进行调制,堆积条件下硅波导中的多数载流子变化会引起折射率变化,从而引起光波传输的相位变化.典型 MOS 电容相移器的结构图见图 4.

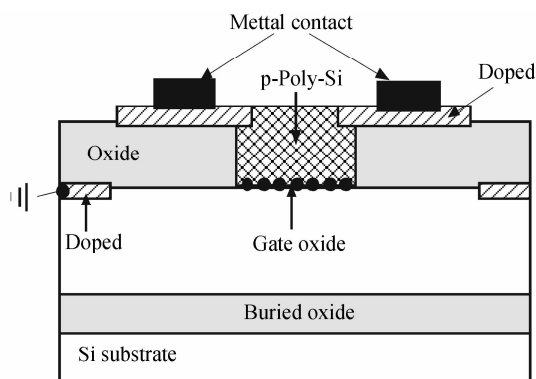


图 4 MOS 结构

Fig. 4 Structure of MOS

S. R Giguere、L. Friedman 及 R A Soref 等人对基于 MOS 结构的光子器件进行了原理上的探索,并进行了软件上的仿真^[19].仿真结果表明,栅极电压变化为 -25 V 时,折射率的变化可达 -0.005 至 -0.007 .同时指出,不管栅极电压是正电压还是负电压都将产生负的折射率变化.负的栅极电压造成空穴积累,正的栅极电压对应电子反型,负的栅极电压获得的折射率变化比正栅极电压获得的折射率变化大.

Intel 公司在 2004 年成功研制了基于 MOS 结构的高速硅光调制器,其光学结构采用 MZI 结构,调制带宽超过 1 GHz ^[20].在数据传输速率为 1 Gbps 的试验中,他们设计的 MZI 光调制器(干涉臂长度为 2.5 mm)能很好的调制伪随机二进制序列.研究还指出,有两个提高器件效率的方法:减小波导尺寸和减小栅氧层厚度.该研究成果发表于《自然》杂志,足见其重大意义.2005 年,Intel 公司还设计制造了一只性能更好的光调制器^[21],该器件光学结构为 MZI,干涉臂长度为 13 mm ,调制带宽高达 10 GHz ,数据传输速率可到 10 Gbps .这些良好的性能是通过提高材料质量、优化器件设计和改善驱动电路获得的.

基于 MOS 结构的光子器件的优点有:在电荷堆积过程中,没有慢速载流子产生,也不存在复合,因此 MOS 相移器可获得较高的调制速度、功耗小,直流条件下的功耗几乎可以忽略;折射率的变化只

发生在栅极下面的局部区域,所以不需要考虑载流子限制.但是其明显的缺点是调制效率低,这使得器件尺寸会比较大会比较大,同时调制速度或开关速度也会受到 RC 参量的限制.

1.4 PN 结结构光子器件

PN 结在结构上跟 P-I-N 结构相似,其工作原理却跟 MOS 结构相似,可以说是 MOS 结构的改进.MOS 电容器掺杂区域之间的电介质层被 PN 结的耗尽宽度取代,使得器件电容下降,从而提高了调制带宽.早在 1986 年,R. A. Soref 和 J. P. Lorenzo 指出可以利用加反向偏压的 PN 结来控制电场^[2].PN 结的工作原理正是利用反向偏压控制电场从而引起多数载流子变化来获得折射率变化.反向偏压 PN 结结构是设计高速光调制器的有效手段.近几年,基于该结构的高速光调制器研究成果频频出现.反向 PN 结结构见图 5.

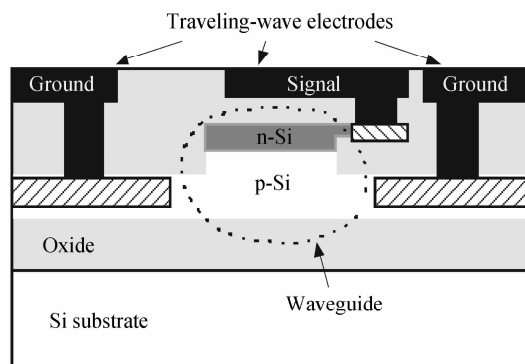


图 5 PN 结结构

Fig. 5 Structure of PN junction

2005 年,F. Y. Gardes 等人提出了一种基于 SOI 材料的亚微米耗尽型光调制器^[22],其调制机理是 PN 结中的载流子耗尽效应.反向偏压 5 V 时,上升时间和下降时间为 7 ps ,但是器件长达 2.5 mm .2006 年,Luxtera 公司基于 PN 结结构,用 $0.13\text{ }\mu\text{m}$ CMOS 工艺制作了集成了光子调制器、复用器/解复用器及电子电路的单芯片,速度高达 10 Gbps ^[23].光子器件与电子电路实现单片集成.

2007 年,Intel 公司报道了数据传输速度高达 30 Gbps 和 40 Gbps 的高速光调制器^[24-25].调制器的光学结构采用 MZI 结构,电极为行波电极.高速的光调制器使硅光子集成化芯片可应用于下一代通讯网络、光互连、高性能计算机以及未来超大规模集成电路之间的高速数据互连.

可以通过优化 PN 结位置和增加相移器长度进一步提高器件的消光比.但这也会引起光损耗的增大、对驱动电路要求更高和增加封装的复杂性^[26].

2 采用 P-I-N 结构的载流子色散型硅基 CMOS 光子器件研制

基于 SOI 材料,采用 P-I-N 结构设计了一系列载流子色散型硅基 CMOS 光子器件,包括基于 MZI、多模干涉仪 (Multimode Interference, MMI) 与微环等基本功能结构的调制器和光开关,以及由上述基本功能器件组合获得的新结构、新功能器件,见图 6。由于 0.8 微米 CMOS 工艺线的条件限制,采用的 P-I-N 结构截面及其设计参量见图 7。SOI 材料的 SiO₂ 层厚约 1 μm,顶层硅为 1 μm;基本脊波导宽 1 μm,高约 0.4 μm,这样设计可保证单模条件。器件有源区的长度从 750 μm 到 2 000 μm,再加上输入输出端的耦合波导,器件总长度为 7 400 μm。

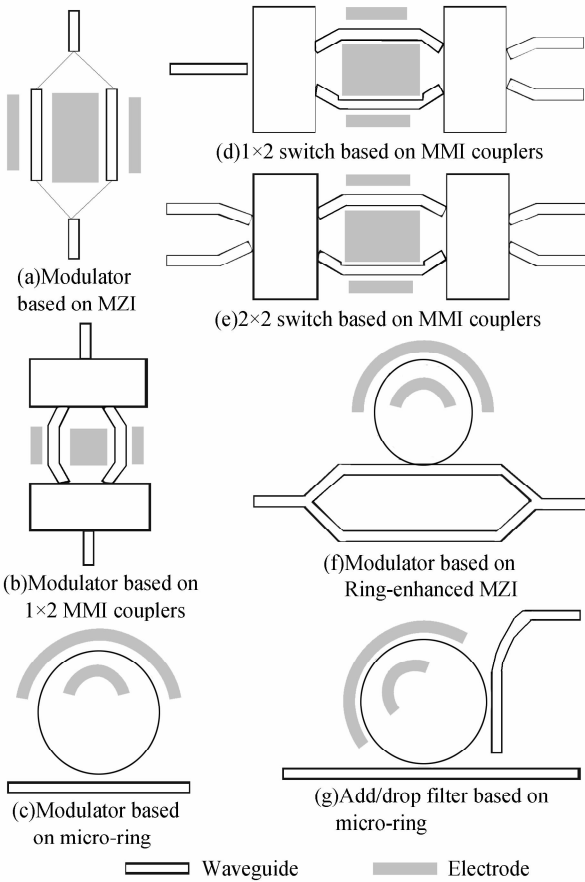


图 6 设计的器件

Fig. 6 Schematic of designed devices

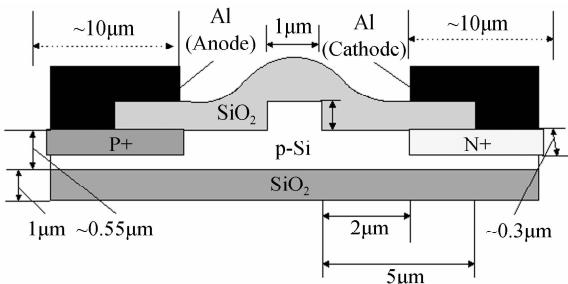


图 7 P-I-N 截面

Fig. 7 Cross section of P-I-N

设计的器件在杭州士兰集成电路有限公司的 0.8 μm 工艺线上成功实现。器件的制作需要 5 张掩模板完成,分别是波导层、N 注入层、P 注入层、通孔层和铝电极层。工艺流程可概括如下:波导层曝光、波导层刻蚀、氧化、N 区曝光、N 区注入、N 区去胶、P 区曝光、P 区注入、P 区去胶、淀积 SiO₂、通孔区曝光、通孔区刻蚀、溅射铝层、电极区曝光、电极区刻蚀、退火处理。图 8 为研制的六英寸样片照片。

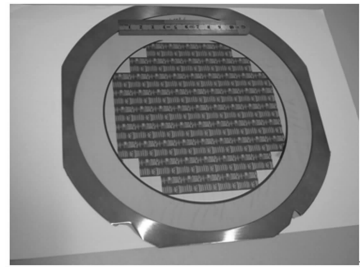


图 8 研制的样片照片

Fig. 8 Photo of the Chips

器件测试结果表明,P-I-N 结的开启电压约 0.7 V,线性区电阻约 20 Ω。基于 MZI 的调制器的消光比约 18 dB,获得 π 相位变化时的注入电流约为 20 mA(干涉臂长 1.5 mm)。基于 MMI 的 1×2 光开关的消光比约 21 dB,图 9 是光开关的输出光强随注入电流的增加而变化的测试结果。谐振环的消光比一般在 8~12 dB,图 10 是谐振曲线随注入电流的增加而蓝移的测试结果。

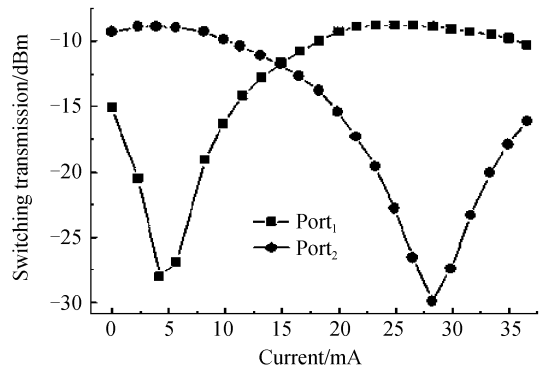


图 9 1×2 光开关测试结果

Fig. 9 The test result of 1×2 optical switch

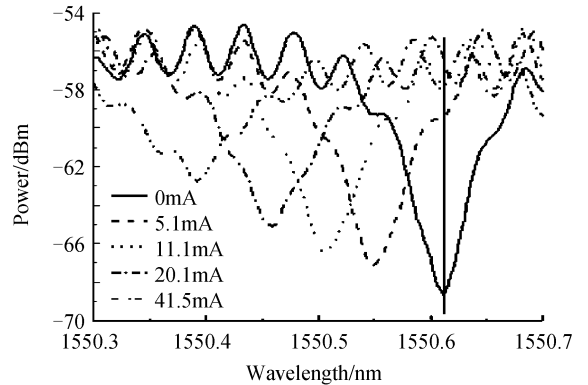


图 10 谐振环测试结果

Fig. 10 The test result of ring-resonator

3 结论

基于载流子色散效应的硅基光子器件的研究始于 20 世纪 80 年代,之后,越来越多的研究人员加入这一领域,推动这一领域快速发展,取得了显著的研究成果. P-I-N、BMFET、MOS 和 PN 结等电气结构各自的长处和不足逐渐清晰,如何扬长避短设计出尺寸更小、性能更好的器件将是以后一段时间内的重要课题. 随着研究的逐渐深入和成果的不断取得,我们有理由相信,硅基 CMOS 光子器件离实用化不再遥远.

致谢:感谢杭州士兰集成电路有限公司在 CMOS 器件制作上的帮助和为科技基金项目的资助.

参考文献

- [1] WILLANDER M. Carrier dependent parameters in a silicon optical waveguide[J]. *J Appl Phys*, 1983, **54**(8): 4660-4663.
- [2] SOERF R A, LORENZO J P. All silicon active and passive guided-wave components for $\lambda=1.3$ and $\lambda=1.6 \mu\text{m}$ [J]. *IEEE Journal Quantum Electronics*, 1986, **22**(6): 873-879.
- [3] SOERF R A, BENNETT B R. Electrooptical effects in silicon [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, **23**(1): 123-129.
- [4] LORENZO J P, SOERF R A. $1.3 \mu\text{m}$ electro-optic silicon switch[J]. *Appl Phys Lett*, 1987, **51**(1): 6-8.
- [5] SOERF R A, SCHMIDTCHEN J, PETERMAN K. Large Single-Mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SO₂ [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1991, **27**(8): 1971-1974.
- [6] YIN Yuan, DAI Dao-xin, SHI Rao-cheng, et al. Analysis of the Single-mode condition for a rib SOI waveguide with a large cross section[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 669-671. 殷源,戴道锌,时尧成,等.大截面 SOI 脊型波导单模条件的研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(5): 669-671.
- [7] CHAN S P, PNG C E, LIM S T, et al. Single-mode and polarization independent silicon-on-insulator waveguides with small cross section [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(6): 2103-2111.
- [8] XIAO X, STURM J C, SCHWARTZ P V. Fabry-Perot optical intensity modulator at $1.3 \mu\text{m}$ in silicon [J]. *IEEE Photonics Tech Lett*, 1991, **3**(3): 230-231.
- [9] TREYZ G V, MAY P G, HALBOUT J M. Silicon Mach-Zehnder waveguide interferometers based on the plasma dispersion effect [J]. *Appl Phys Lett*, 1991, **59**(7): 771-773.
- [10] LIU Y, LIU E, ZHANG S, et al. Silicon 1x2 digital optical switch using plasma dispersion [J]. *Elec Lett*, 1994, **30**(2): 130-131.
- [11] LIU Y, LIU E, LI G, et al. Novel silicon waveguide switch based on total internal reflection [J]. *Appl Phys Lett*, 1994, **64**(16): 2079-2080.
- [12] WANG C C, CURRIE M, ALEXANDROU S, et al. Ultrafast, all-silicon light modulator [J]. *Opt Lett*, 1994, **19**(18): 1453-1455.
- [13] DAINESI, KUNG A, CHABLOZ M, et al. CMOS compatible fully integrated Mach-Zehnder interferometer in SOI technology [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(6): 660-662.
- [14] XU Q, SCHMIDT B, PRADHAN S, et al. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator [J]. *Nature*, 2005, **435**: 325-327.
- [15] MANIPATRUNI S, XU Q, SCHMIDT B, et al. High speed carrier injection 18 gbps silicon micro-ring electro-optic modulator [C]. The 20th annual meeting of IEEE Lasers and Electron-Optics Society, 2007.
- [16] ZHOU G R, GEIS M W, SPECTOR S J, et al. Effect of carrier lifetime on forward-biased silicon Mach-Zehnder modulators [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(8): 5218-5226.
- [17] CUTOLO A, IODIC M, SPIRITO P, et al. Silicon electro-optic modulator based on a three terminal device integrated in a low-loss single-mode SOI waveguide [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(3): 505-518.
- [18] SCIUTO A, LIBERTINO S, ALESSANDRIA A, et al. Design, fabrication, and testing of an integrated Si-Based light modulator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**(1): 228-235.
- [19] GIGUERE S R, FRIEDMAN L, SOERF R A, et al. Simulation studies of silicon electro-optic waveguide devices [J]. *Journal Appl Phys*, 1990, **68**(10): 4964-4970.
- [20] LIU A, JONES R, LIAO L, et al. A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor [J]. *Nature*, 2004, **427**: 615-618.
- [21] LIAO L, RUBIO D S, MORSE M, et al. High speed silicon Mach-Zehnder modulator [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(8): 3129-3135.
- [22] GARDES F Y, REED G T, EMERSON N G, et al. A sub-micron depletion-type photonic modulator in silicon-on-insulator [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(22): 8845-8854.
- [23] HUANG A, GUNN C, LI G, et al. A 10 Gbps photonic modulator and WDM MUX-DEMUX integrated with electronics in $0.13 \mu\text{m}$ SOI CMOS [C]: ISSCC 2006.
- [24] LIU A, LIAO L, RUBIN D, et al. High-speed optical modulation based on carrier depletion in a silicon waveguide [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(2): 660-668.
- [25] LIU A, LIAO L, RUBIN D, et al. High-speed silicon modulator for future VLSI Interconnect [C]: 2007 OSA/IPNRA.
- [26] BASAKA J, LIAO L, LIU A, et al. Developments in gigascale silicon optical modulators using free carrier dispersion mechanisms [J]. *Advances in Optical Technologies*, 2008: 10 pages.

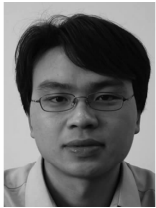
Silicon-based CMOS Photonic Devices Using Carrier Dispersion Effect

ZHAO Yong,JIANG Xiao-qing,YANG Jian-yi,WANG Ming-hua

(*Department of Information Science and Electronic Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: In order to realize the practical application of the Silicon-based optoelectronic devices, the progress and characteristics of Silicon-based CMOS photonic devices using carrier dispersion effect with structures of P-I-N, Bipolar Mode Field Effect Transistor(BMFET), Metal Oxide Semiconductor(MOS) and PN junction are reviewed. And our work in design and fabrication of Silicon-based CMOS photonic devices is reported. The devices fabricated by commercial CMOS process have expected results. The extinction ratios of an optical modulator, a 1×2 optical switch and a ring resonator are about 18 dB, 21 dB and 8~12 dB, respectively. The introduction of CMOS technology to the design and fabrication of Silicon-based photonic devices will make integrated optics be on a new level.

Key words: Integrated optics; Silicon-based; Carrier dispersion effect; CMOS photonic devices



ZHAO Yong was born in 1980. He is a Ph. D. candidate in Zhejiang University, and his interest focus on Silicon-based integrated optics.