

硅基 GHz 高速电光调制器研究进展

屠晓光[†] 陈少武 余金中

(中国科学院半导体研究所 集成光电子国家重点实验室 北京 100083)

摘要 硅基高速电光调制器是新一代密集波分复用系统和光时分复用系统中的关键光电子器件,他的运用可以降低光通讯系统的制作成本并且大大有利于未来的硅基光电集成. 目前国际上已经实现的硅基高速电光调制器件的调制速率已经超过 6GHz. 文章对国外硅基高速电光调制器的最新研究进展进行了介绍,评述了各种基于不同电学和光学结构的硅基电光调制器,对不同类型器件在制作和应用中的优缺点进行了比较.

关键词 硅基光子集成,电光调制器, p-i-n 结构, MOS(金属氧化物半导体)结构

Silicon-based GHz high speed electro-optic modulators

TU Xiao-Guang[†] CHEN Shao-Wu YU Jin-Zhong

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, PO Box 912, Beijing 100083, China)

Abstract Silicon-based high speed electro-optic modulators are essential components of high-capacity wavelength-division-multiplexed transmission systems of the present and next generations. They greatly increase the bandwidth and speed of fiber transmission systems at a low cost. Currently, electro-optic modulators with switching speeds exceeding 6GHz have been fabricated using methods compatible with CMOS manufacturing processes. We describe various kinds of silicon-based electro-optic modulators based on different electrical and optical structures, and discuss the advantages and disadvantages in their fabrication and application. The latest progress in the development of such modulators is summarized.

Keywords silicon-based photonics integration, electro-optic modulator, p-i-n structure, MOS(metal-oxide-semiconductor) structure

1 引言

硅材料作为微电子领域的传统材料,在加工工艺和制作成本上有着其他材料无可比拟的优势. 20 世纪 80 年代,人们对大容量、宽带宽,特别是低成本的信息传输系统的渴望导致了硅基光电子学的诞生. 许多传统的基于 III-V 族材料的电光调制器利用直接电光效应实现了 40GHz 高速电光调制,但是器件制作成本高,而且与微电子工艺不兼容,而硅基材料是能够做到低成本 OEIC 集成的首选.

工作波长位于 1.3 μm 和 1.55 μm 光通讯波段

的硅基高速电光调制器是国际研究的重点. 硅基高速电光调制器不仅是未来光交叉互连(OXC)和光分插复用(OADM)系统中的核心器件,而且在芯片光互联和光计算技术中也具有很大的应用前景. 因此,开展硅基高速电光调制器的研究意义重大.

硅材料中的电光效应分为直接电光效应和间接电光效应,其中直接电光效应包括 Pockels, Kerr 效应等,间接电光效应包括 F-K 效应,等离子色散效应等. 由于体硅材料没有一阶电光效应,高阶电光效应又非常微弱,硅基高速电光调制的调制机理一般

2005-08-09 收到初稿 2005-09-26 修回

[†] 通讯联系人. Email: tuxiaog@red.semi.ac.cn

都利用硅材料的等离子色散效应^[1]. 等离子色散效应是一种间接电光效应,它利用外加电场下,有源区自由载流子浓度的变化调制输出光波的幅值和相位从而实现电光调制.但是,由于受到载流子本身的复合寿命的限制,器件的开关速度只能达到 MHz 量级.要想提高硅基电光调制的速度,必须开发新的调制器结构.

硅基电光调制器按电学结构划分主要包括 p-i-n 结构、三端结构和 MOS 电容结构等;按光学结构划分,有 MZI 结构、F-P 结构、布拉格(Bragg)光栅结构和微环共振结构等.

本文重点是结合当前国内外器件的制作工艺和硅基光电子学的发展趋势,对国际上出现的不同结构的硅基高速电光调制器及其性能指标进行分析比较,并对其发展前景进行展望.

2 不同结构的硅基高速电光调制器

由于硅基材料本身性质的局限,传统的电光调制器件的调制速度并不能满足未来信息高速传递的要求.为了达到高速调制,基于等离子色散效应的调制原理,国际上对硅基电光调制器的结构进行了各种各样的设计和改进并获得了较好的结果.

2.1 注入型布拉格光栅结构高速电光调制

Bragg 光栅结构是国际上较早开始研究的一种高速电光调制结构. Bragg 光栅是一种周期性结构.他的中心波长可以表示为 $\lambda_B = 2N_{eff}\Lambda$,其中 N_{eff} 代表有源区有效折射率, Λ 代表光栅周期. 通入电流后,外界载流子的注入引起有源区材料的有效折射率 N_{eff} 发生变化,导致光栅结构中心波长的漂移,使原来处于中心波长的光从导通态变为截止态,从而实现了电光调制^[2,3]. 这种结构实现高速调制的原因在于, Bragg 光栅结构对入射光波长具有选择作用,有效折射率微小的变化可以带来输出光强的大范围改变. 图 1 表示了 Bragg 光栅反射率和有源区折射率的变化关系,可以看到反射谱线的边缘有很大的斜率.

注入型表面 Bragg 光栅结构如图 2 所示,通过在横向 p-i-n 结构的脊形波导表面刻蚀光栅,就形成了 Bragg 光栅结构电光调制器. 制作过程中,首先在 SOI 衬底上刻蚀出光栅,然后二次刻蚀形成脊形台面,离子注入制作高掺杂区,最后引出电极. 刻蚀深度和光栅周期的选择满足 Bragg 光栅的中心波长为

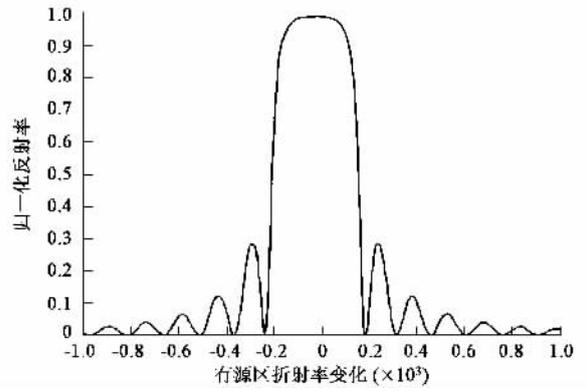


图1 Bragg 反射谱

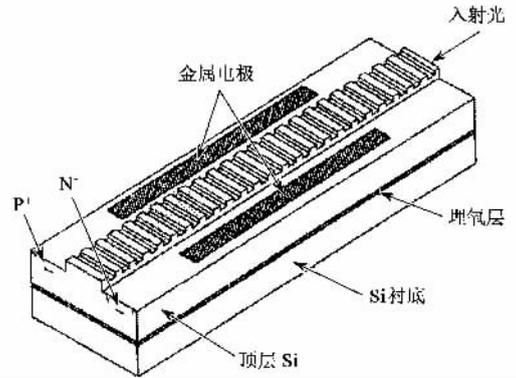


图2 硅基 Bragg 光栅结构电光调制器示意图

光通讯的特征波长. 通入电流后,根据等离子色散效应,调制区自由载流子浓度的增加导致有源区的有效折射率减小,从而使处于中心波长的输出光的光强减弱.同时,载流子浓度的变化带来的吸收系数的增加也使得输出光强减弱.两者的共同作用可以获得器件的高调制度.如果采用宽度和高度均为 $1\mu\text{m}$ 的脊形波导结构, 3mm 的调制区长度,测量得到的器件的开关速度可以达到 1.4GHz . 在满足器件制作工艺的同时,减小调制区的面积可以使光场更加集中于有源区内,有利于器件调制度和调制速度的进一步提高.正是由于这个原因,硅基波导器件正不断的向小尺寸、高折射率差的方向发展.但这对器件的制作工艺也提出了更高的要求.

这种光栅结构的光栅周期都在亚微米量级,如此小的线条一般都需要高性能的曝光工具和光刻机.刻蚀水平决定了光栅侧壁的粗糙度,粗糙的侧壁会大大增加光波的传输损耗,因此光刻和刻蚀系统的水平决定着光栅结构的质量和器件的性能.国际上如意大利的 A. Cutolo 领导的科研小组,在完善的

制作工艺的基础上对此类结构的高速电光调制器进行了深入研究. 这种器件由于对光刻和刻蚀水平要求严格, 目前还停留在研究阶段, 但是他具有原理简单、工艺步骤少的优点, 在性能进一步稳定之后, 比较适合大规模开发.

2.2 微环共振结构高速电光调制

近年来, 微环共振结构硅基高速电光调制器件发展迅速. 微环结构的形成是通过将波导制成半径在微米量级的微型圆环, 传输在微环中的光波就会产生共振. 微环结构同样具有波长选择功能, 他与光栅结构相比降低了对制作工艺的要求. 高品质因子的环形共振器通过与直波导之间的耦合, 实现输出波导内传输光场的导通和截止. 为了缩小器件体积, 降低弯曲波导损耗, 微环共振结构多和小尺寸、高折射率差波导结合使用. 现在已经实现的微环结构, 微环半径已经做到了 $6\mu\text{m}$, 品质因子达到 39350. 微环结构可以和多种电学结构相结合, 实现高速电光调制^[6].

共振微环集成 p-i-n 结构的硅基高速电光调制如图 3 所示. 整个器件结构通过电子束光刻和 RIE 刻蚀技术完成. 调制器由直波导部分和微环两部分组成. 微环和直波导之间最小间距 200nm, 波导宽度 450nm. 微环内部和外部集成了电极结构用于注入载流子. 加电时, 从直波导的一端输入的光直接通过波导, 从另一端输出; 不加电时, 直波导中的光被耦合进共振微环中, 直波导输出端无光输出. 高折射率差结构不仅减小了器件的尺寸, 而且提高了器件的开关速度.

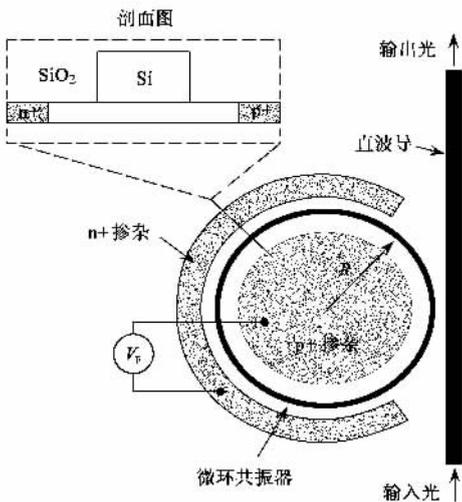


图 3 硅基微环共振结构高速电光调制器示意图

与 MZI 结构相比, 微环结构具有速度优势. 由于这种器件开启电压低, 当外加电压超过开启电压后, 随着电压的升高, 直波导部分的光输出强度可以一直保持稳定值. 在高外加电压下, 不用等到 p-i-n 结达到稳定态, 输出光强就可以达到峰值. 因此, 器件上升时间将不受传统的 p-i-n 结构较长的上升时间的限制.

由于直波导和微环之间没有足够的空间制作电极结构, 因此调制效应只发生在部分微环结构上, 扩散到非调制区的电子和空穴在反向偏置情况下没有得到及时的抽取, 影响了器件的开关速度. 测量得到的器件开关速度达到 0.4Gbits^{-1} .

有关微环共振结构的研究在国际上已经开展多年, 而且其在 DWDM 系统中的应用也日趋成熟. 高品质因子的微环共振结构为硅光调制器的设计提供了新的思路, 但要进一步提高器件开关速度, 除了在缩小光波导器件尺寸的同时还要在电学结构上有所突破.

2.3 MOS 电容结构高速电光调制

Intel 公司在 2004 年初将 MOS 电容结构应用到硅基电光调制器件中, 在 SOI 衬底上成功实现了 GHz 开关速度的电光调制^[7], 有评论称这是硅基光电子学的里程碑, 它标志着一个崭新的硅光子学时代的来临^[8]. 随后, Intel 公司又相继提出了硅基拉曼光放大器以及拉曼光调制器^[9], 并对最初提出的光调制器进行了改进^[10]. 目前, 改进的 MOS 电容结构光调制器的开关速度已经超过了 6GHz ^[11].

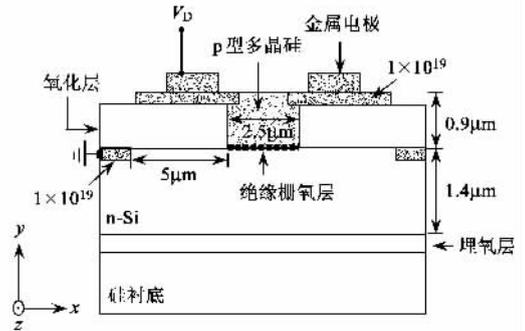


图 4 硅基 MOS 电容结构高速电光调制器示意图

MOS 电容结构是对普通 MOS 结构的改进, 其结构如图 4 所示, 在 SOI 衬底上, 首先制作一层厚氧化硅层, 然后刻蚀氧化硅到达 SOI 顶层硅表面. 在表面制作厚度为 10nm 左右的薄栅氧化层, 然后利用低压化学气相沉积 (LPCVD) 法, 制作无定形硅, 退

火后形成顶层多晶硅. 多晶硅层延伸到两侧氧化层的上方, 并在其上制作欧姆接触.

栅氧化层夹在两层硅层之间形成了纵向的电容结构. 加电时, 栅氧层附近将会有大量电荷的积累. 由于电容结构避开了慢速的载流子产生和复合过程, 因而器件可以实现高速调制. 将顶部电极设计在脊形波导两边避开了电极对光场的吸收损耗. 这种器件的新颖之处在于外加电压后, 薄层绝缘层的引入将原本分布于整个有源区的自由电荷收集在了接近光场中心的位置, 实现了调制区与光场的交迭. 进一步降低绝缘层的厚度既可以增加电容收集电荷的数量, 又减小了反波导效应对整个光场模式的影响^[15].

MOS 电容结构的缺点包括, 首先, 多晶硅对会带来器件大的传输损耗; 其次, 由于电容结构本身特性的局限, 调制区仅处于电容极板附近几十纳米的范围内, 调制效率较低, 器件尺寸长. Intel 公司针对这些缺点提出了改进措施, 他们用横向向外延过生长的办法将顶层的多晶硅用单晶硅代替, 并且进一步缩小了器件的横截面尺寸, 改进的器件数据传输速率达到了 10Gbits^{-1} , 插入损耗 19dB , 但是调制效率低的问题依然没有得到很好的解决.

目前, 这种利用氧化层电容结构制作的电光调制器的速度特性在硅基电光调制器领域里遥遥领先, 但是它的性能与铟酸锂电光调制器以及下面将要介绍的量子阱结构电光调制器相比还有很大差距. Intel 公司下一步将从如何提高器件调制效率、减小插入损耗入手, 通过优化器件结构, 缩小横截面尺寸等手段进一步提高器件性能. 相信在不久的将来, 会有实用的产品问世. 国内由于工艺条件的限制, 这方面的研究相对滞后, 除了香港科技大学^[12]对相关结构进行的一些理论研究之外, 还没有实际的氧化层电容结构的电光调制器的相关报道. 我们对 MOS 电容结构进行了深入的分析, 目前已经提出了双栅并联 MOS 电容结构和纵向栅结构, 目的是提高器件的调制度, 降低工作电压, 理论分析和器件模拟表明调制度确有较大程度的提高^[14].

2.4 GeSi/Si 量子阱结构高速电光调制

传统的量子阱吸收调制器多采用 GaAs 系和 InP 系材料, 利用 GeSi/Si 量子阱结构制作的调制掺杂高速电光调制近几年来发展迅速, 这里我们对这种类型的调制器件作一简单介绍.

一种 SiGe/Si 调制掺杂多量子阱集成 p-i-n 电

极结构的电光调制器如图 5 所示^[13]. 这种结构通过 p-i-n 二极管反向偏压下调制区内自由载流子浓度的耗尽, 实现调制区有效折射率的改变. 由于调制过程中只存在载流子的耗尽过程, 避开了影响器件速度的载流子的积累, 因此器件可以实现高速工作. 这种结构中 GeSi 层作为空穴的积累层. 在零偏压下, 空穴被有效的限制在量子阱中, 当外加反向偏压后, 由于能带的弯曲, 载流子被扫出量子阱结构. 不同偏压下, 自由载流子浓度的变化带来了有源区有效折射率的改变, 从而实现了电光调制. 已经报道的有源区厚度 350nm 的电光调制器件的最大调制速度达到 13GHz . 通过对器件量子阱层数、厚度和掺杂浓度进行优化, 可以获得更高的调制速度.

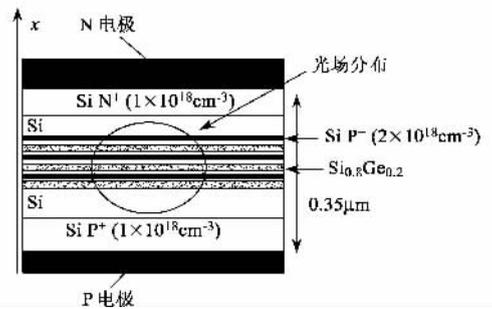


图 5 硅基量子阱结构高速电光调制器示意图

量子阱结构本身的特点决定了这种结构的调制区不可能做得很厚, 其厚度一般都在亚微米量级. 小的调制区面积有利于提高器件的调制速度, 但是对光纤耦合提出了要求. 由于在高反向偏压下, 热扩散引起的折射率的变化量已经可以和电光效应产生的折射率变化相当, 所以器件只能在相对低的反偏压下工作. 这在一定程度上限制了其在未来的应用.

国际上, 法国的 Delphine Marris 小组对这种结构的高速电光调制器有过深入研究. 国内在这方面的研究, 中国科学院半导体研究所硅基组目前开展过大量工作, 并取得了一些可喜的成果. 这种器件结构的理论成熟, 制作工艺相对简单, 但还没有见到成品投放市场.

3 发展趋势

以上总结了各种硅基高速电光调制器的不同结构, 表 1 给出了几种典型的硅基高速电光调制器性能比较.

表1 硅基高速电光调制器性能比较

调制器类型	开关速度	插损	调制度	调制区尺寸	工艺难度
Bragg 光栅结构	1.4GHz	1dB	50%	$1 \times 1 \mu\text{m}^2$	较难
微环共振结构	0.4GHz	$4 \pm 1 \text{dB}$	97%	$0.45 \times 0.25 \mu\text{m}^2$	较难
MOS 电容结构	6—10GHz	$>15.3 \text{dB}$	98%	$1.9 \times 2.3 \mu\text{m}^2$	较难
量子阱结构	$>10 \text{GHz}$	高	低	$0.35 \mu\text{m}$	简单

国际上硅基高速电光调制器的类型较多,调制机理趋于稳定,都是利用等离子色散效应改变硅基材料的折射率.在光学结构上,高品质因子的光栅结构以及微环结构能够带来器件高的调制速度.影响这种器件速度特性的因素主要来自电学结构的设计上.目前国内的工艺水平制作这种亚微米尺度的结构还有一定困难.但随着工艺水平的不断成熟,光栅结构和微环结构将会成为研究的热点.在电学结构上,MOS电容结构的提出为更高性能的硅基电光调制器件的设计提供了突破口.这种结构很多地方还可以进一步优化,而且其制作工艺完全和微电子工艺兼容.Intel公司将最有可能第一个实现硅基MOS电容结构高速光调制器的产品化.在波导尺寸上,器件正不断的向小型化的方向发展,国际上已经出现了尺寸在 $0.3 \mu\text{m}$ 量级的硅线光波导器件.通过目前世界技术水平和我国的研究状况对比,可以明显看出,我国在硅基高速电光调制器的研究方面还处于初期阶段,和国外的差距较大,这种差距主要体现在器件制备工艺上,在器件结构设计上,国内仍然能够

走在国际前列.在传统p-i-n结构电光开关的基础上继续高速调制器的研究,缩小与国外先进水平的差距是我们今后努力的方向.

参 考 文 献

- [1] Soref R A, Bennett B R. IEEE J. Quantum Electron. ,1987, QE-23 :123
- [2] Cutolo A, Iodice M, Irace A *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1997, 71 :199
- [3] Irace A, Breglio G, Cutolo A. Electronics. Lett. ,2003, 39 :2332
- [4] Yariv A, Nakamura M. IEEE J. Quantum Electron. ,1976, QE-13, 233
- [5] 方俊鑫等.光波导技术物理基础.上海:上海交通大学出版社,1988.82[Fang J X *et al.* Technology and Physics Foundation of Optical Waveguide. Shanghai :Press of Shanghai Jiao Tong University ,1988.82(in Chinese)]
- [6] Xu Q F, Schmidt B, Pradhan S *et al.* Nature. ,2005, 435 :325
- [7] Liu A S, Jones R, Liao L, *et al.* Nature. ,2004, 427 :615
- [8] Reed G T, Nature. ,2004, 427(12) :
- [9] Jones R, Liu A S, Rong H *et al.* Opt. Express. ,2005, 13 :1716
- [10] Liu A S, Rubio D S, Liao L *et al.* IEEE J. Sel Top Quantum Electron. 2005, 12 :367
- [11] Liao L, Rubio D S, Morse M *et al.* Opt. Express. 2005, 13 :3129
- [12] Li C, Poon A W, 2004 1st IEEE International Conference on Group IV Photonics, HongKong China, Oct. 2004. WB2
- [13] Marris D, Cassan E, Vivien L J. Appl. Phys. ,2004, 96 :6109
- [14] Chen S W, Tu X G, Yu J Z. 2005 2nd IEEE International Conference on Group IV Photonics, Antwerp, Belgium, Sept. 21-23, 2005
- [15] Almeida V R Xu Q, Barrios C A *et al.* Opt. Lett. 2004, 29 :1209

· 物理新闻和动态 ·

电场喷射活细胞

一般人使用喷墨打印机来打印文件和图片.这种技术将细小的彩色墨滴从喷嘴中挤压出来.然而,在电子学和医学中正越来越多地用这种技术产生小体积的液滴.例如,使用压电晶体从一根针头中挤压出含有细胞的溶液,产生活细胞的二维和三维图像.但是细胞液滴的大小受到针头直径大小的限制.因而这种方法不能产生小于 $100 \mu\text{m}$ 左右的液滴.这意味着很难制成带有细微特征的小的生物组织.

英国研究人员开发的一种叫做“电动流体力学喷注”的新技术解决了这一问题.他们使含有人体活细胞的悬浮液以可控的流速通过一根直径为 $500 \mu\text{m}$ 的不锈钢针头.在针头与一个电极之间加以高达30kV的电压,使液体带电.在离开不锈钢针头之后,外加电场将液体变成一股喷注.这种喷注是不稳定的,会变成无数的小液滴.与传统的喷墨技术相比,这种方法的优点在于可以从直径大到数百微米的针头中产生小到直径只有几微米的小液滴.但是研究者不很肯定这种技术所需要使用的高电压是否会破坏活细胞.他们已证明电场高到30kV时细胞不致受到损坏.这种技术可能对于在微米和纳米尺度上建立预定的生物结构(如组织和器官)的两维和三维图像具有潜在的应用价值.这是一种目前用其他喷注方法尚不能实现的技术.有关论文发表在Biotechnology Journal 186.

(树华 编译自 Physics web news 11 January 2006)