

文章编号:1672-3392(2011)05-0038-04

基于双缝隙结构的电光调制器设计与工艺实现

谢静雅 周林杰 李新碗 孙晓萌 陈建平

(上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

摘要 受铜线带宽小、延时大、功耗高的限制,下一代芯片互连较为可行的一种解决方式是采用光互连。调制器作为其中的关键器件,有重要的研究意义。设计了一种新型的硅基双缝隙波导电光调制器,该调制器结构采用法布里-珀罗微谐振器,依靠缝隙内高非线性聚合物的快速电光效应,通过外加电压达到调制效果。调制器结构包含了新型的一般微纳波导到双缝隙波导的模式转换器,降低了传输损耗,也更利于电极的工艺制作。首先对设计结构进行仿真分析,得到合适的设计参数。然后,对调制器所需的工艺进行反复验证,包括工艺制备中参数的优化等,通过使用电子显微镜已观测到较好的光刻线宽、刻蚀深度以及侧壁粗糙度。初步完成了调制器硅基部分的制备,为下一步聚合物工艺打下基础。

关键词 电光调制器; 双缝隙波导; 法布里-珀罗微谐振器; 光子晶体

中图分类号 TN15 **文献标识码** A

1 引言

硅基电光调制器作为电信号转化为光信号的核心器件,近年来已成为研究热点。Cornell 研制了基于微环谐振器的调制器^[1],使用注入型 p-i-n 二极管,其驱动电压和功耗比较大;MIT 和 Stanford 大学致力于发展基于 Si-Ge 量子阱的波导电吸收调制器^[2,3],这类调制器的损耗比较大而且制作工艺复杂;Intel 和 IBM 的硅光电子实验室一直致力于马赫-曾德(MZI)硅基调制器的研究^[4,5],然而它的大尺寸和高功耗不利于大规模集成;Luxtera 和 Kotura 作为致力于发展硅光电子技术的领先厂商,积极研发基于 CMOS 标准工艺的光子收发模块^[6,7],然而也未完全达到光互连对调制器性能的要求。国内许多大学和科研院所近年来也积极投入了对高速、低功耗硅基调制器的研究^[8]。对于微环调制器,其热敏性波长选择调制在很大程度上限制了它在芯片内光互连上的应用。微环谐振器的谐振波长对温度相当敏感,温度每升高 10 °C,谐振频率就会红移约 1 nm^[9]。这就要求调制器必须工作在恒温条件下,或使用复杂的温控元件来

固定波长,这不仅增加了设计的复杂度,而且也增加了芯片的额外功耗。

本文利用硅波导高模场约束性(小尺寸的优势)和低吸收损耗的特性,辅以高非线性、负热光系数的电光聚合物来设计新型的高速、低功耗、无热化的硅基调制器。采用双缝隙结构可以有效地增强聚合物和光波导模场的交叠,提高调制效率,获得更优的调制性能。借助成熟的 CMOS 制造工艺,初步探索了调制器的工艺加工,为最终器件的制备做好了准备。

2 器件结构

图 1 所示是所设计调制器的示意图。调制器的实现是基于以一对光子晶体反射镜构成的法布里-珀罗(Fabry-Perot)微谐振器,通过对微谐振器腔体内复合波导相位的调节控制谐振器的谐振频率,实现对谐振波长的调制。通过优化结构设计,使聚合物的负热光效应抵消硅材料正热光效应,实现波长调制的热稳定性^[10]。

对于缝隙波导结构,由于缝隙内聚合物($n=1.6\sim 1.8$)和硅材料($n=3.5$)的高折射率差,TE

收稿日期 2011-07-01; 收到修改稿日期 2011-08-12

作者简介 谢静雅(1987-),女,硕士,主要研究方向为光信号处理。E-mail: xiejingya.ok@163.com

基金项目 973 项目(2011CB301700),国家自然科学基金(60877012,61071011,61001074,61007039,61007052),上海科委项目(10DJ1400402,09JC1408100)资助项目

光模的电场分量在界面具有不连续性,光强主要集中于缝隙内。相对于单缝隙,双缝隙结构进一步增强了光强在缝隙内的分布,也使复合波导设计更加灵活,更容易获得优化的波导特性。

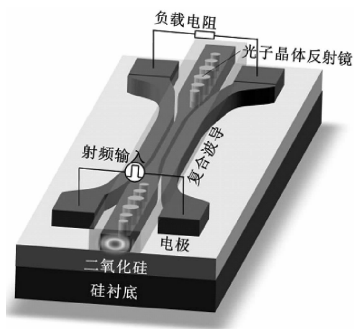


图1 调制器结构示意图

Fig. 1 Structure of the modulator

为了实现对复合波导有效折射率的调节,需要在双缝隙波导上施加电压以改变聚合物的折射率。对于双缝隙波导,可直接利用两侧平行的硅条作为电容极板层,在缝隙内形成高电场。双缝隙波导电容实质上是两级串联电容,外加电压时,电场同时作用于两个缝隙上。复合波导的调制速度和功耗主要由电容充放电决定,因而,缝隙波导需适当掺杂(掺杂浓度 $<10^{17} \text{ cm}^{-3}$),使掺杂引起的吸收损耗远低于波导散射损耗,而在与电极连接处则逐渐增大掺杂浓度(掺杂浓度 $>10^{19} \text{ cm}^{-3}$),减小半导体与金属接触形成的欧姆接触电阻。

法布里-珀罗微谐振器由硅-聚合物复合波导和两端高反射镜构成,具有结构紧凑、设计灵活等特点,可以具有比微环谐振器更小的尺寸。反射镜由一维光子晶体构成,在禁带内光子不能通过,形成高反射。光子晶体反射镜,亦即布拉格(Bragg)反射镜,具有尺寸小、反射带宽大的优点。在光子晶体反射镜结构设计上,拟采用通孔在两端逐渐减小的方式过渡到硅波导,以此来减小模式失配引起的损耗。

3 仿真分析

光波在谐振腔体内传播损耗以及光子晶体反射镜的反射率直接影响微谐振器的谐振性能。在硅微纳波导上刻蚀出6个通孔(最边上两个通孔尺寸变小),可形成高反射光子晶体反射镜。图2(a)所示为使用FDTD计算的反射镜频谱特性。在 $1.5\sim 1.7 \mu\text{m}$ 波长范围内,反射镜反射率可达90%以上。为了分析工艺误差带来的影响,首先仿真波导宽度变化对于反射镜的频谱特性的影响。仿真结果表明,

波导宽度变化 $\pm 20 \text{ nm}$ 对反射镜的频谱基本无影响。我们还仿真了光子晶体中通孔直径的变化对反射镜频谱的影响,如图2(b)所示。从图中可知,随着通孔直径的增加,中心波长逐渐减小;随着直径减小,反射谱的带宽先增大后减小。仿真结果表明,通孔直径波动 $\pm 20 \text{ nm}$ 对频谱特性的影响不是很大。因而,调制器具有较高的工艺容错度,缓减了对工艺条件的苛刻要求,有利于器件的加工。为了获得理想的传输频谱,我们可根据后续工艺制作的结果来对光子晶体的尺寸、周期以及波导宽度进行修正。

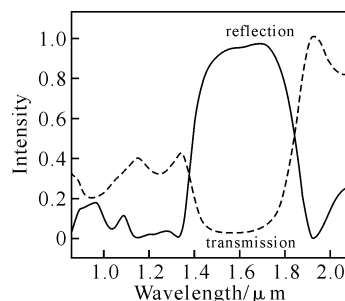


图2(a) FDTD计算的反射镜频谱特性

Fig. 2(a) Spectra responses of the reflector

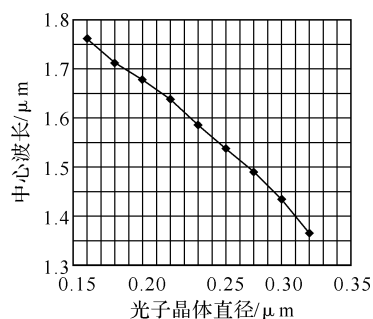


图2(b) 光子晶体直径与反射镜频谱中心波长关系

Fig. 2(b) Center wavelength versus the diameter of photonic crystals

根据上述仿真得到的波导尺寸,通过BPM计算出光波通过 $5 \mu\text{m}$ 长模式转换器时的TE偏振方向模场变化,如图3(a)所示。模场连续变化,转换损耗基本可以忽略不计。同样,由于工艺误差,可能导致缝隙与波导宽度的变化,我们仿真了由此带来的模场变化,如图3(b)所示。当缝隙拓宽至 100 nm ,中间波导缩小为 60 nm 时,缝隙中能量减小,不利于调制。如果缝隙缩小至 40 nm ,中间波导拓宽为 $1.2 \mu\text{m}$,如图3(c)所示。缝隙中的能量分配不均,同样不利于调制。

最后我们选择的波导尺寸为高度 $0.2 \mu\text{m}$,宽度 $0.5 \mu\text{m}$,缝隙宽度 60 nm 。采用上述模式转换器和反射镜,我们计算得到了法布里-珀罗微谐振

器的谐振频谱,如图3(d)所示。输出端谐振 Q 值约为 3×10^3 ,消光比约30 dB。

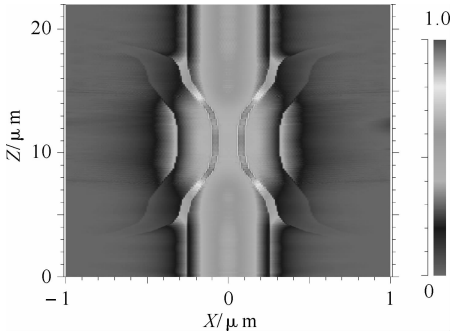


图3(a) BPM模拟的一般波导到双缝隙波导的模式转换
Fig. 3(a) Mode conversion from the regular silicon ridge waveguide to the dual-slot waveguide computed by BPM method

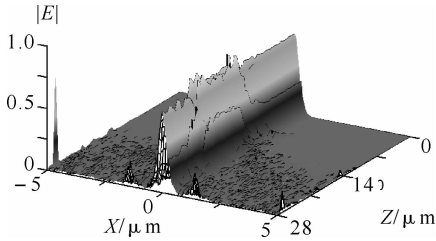


图3(b) 缝隙为100 nm的3D传输谱
Fig. 3(b) 3D propagation mode of 100 nm slot

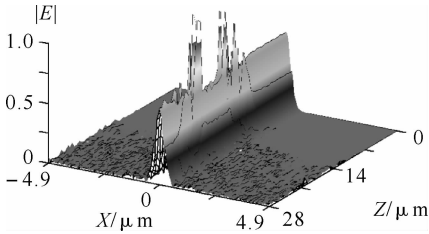


图3(c) 缝隙为40 nm的3D传输谱
Fig. 3(c) 3D propagation mode of 40 nm slot

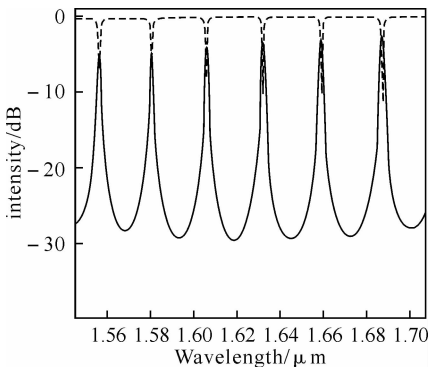


图3(d) 法布里-珀罗谐振器的谐振频谱
Fig. 3(d) Spectra of Fabry-Perot resonator

电势落差主要集中在双缝隙内,外加1 V电压

时缝隙内电场强度可达 8×10^4 V/cm。假设缝隙内电光聚合物的非线性系数为100 pm/V,则聚合物折射率的变化可达 $\Delta n_{\text{poly}} = -0.5r_{33}n_{\text{poly}}^3 E = 0.0016$ 。对于TE光模,光在缝隙内的约束因子约为0.7,因此复合波导有效折射率的变化 >0.001 。此折射率的变化足以使 $Q > 2 \times 10^3$ 的谐振移动一个半峰全宽(FWHM),实现对输入光波的调制。

调制器的调制速度主要取决于聚合物本身的响应速度、谐振器中光子的寿命以及电容充放电的RC延时。非线性聚合物的响应速度相当快(fs量级),远小于其他两个因素对调制速度的影响。基于谐振原理实现的调制器,其速度受到光子在谐振器中寿命的影响,当谐振 Q 值 $< 10^4$ 时,光子寿命 < 10 ps,对应调制速度 > 40 GHz。缝隙宽度60 nm,长度 $10 \mu\text{m}$ 时,聚合物的介电常数约3,根据电容公式 $C = \frac{\epsilon S}{4\pi kd}$ (ϵ 为介电常数, S 是平板电容的面积, K 是静电力常量, d 为电容极板的距离),估算总电容为 < 1 fF,因此即使串联波导电阻为10 k Ω ,RC延时才为10 ps,对应调制速度 > 40 GHz。因此,使用优化器件结构和使用复合波导可实现 > 40 GHz的调制速度。调制器的功耗主要来源于对电容充放电时的动态功耗。1 fF的电容在 $V_{\text{pp}} = 1$ V电压下的平均功耗仅为 $0.25CV_{\text{pp}}^2 = 0.25$ fJ/bit,满足调制器对低功耗的需求。

4 工艺实现

我们采用的双缝隙硅波导和光子晶体反射镜尺寸在几十到几百纳米量级,对光刻及ICP感应耦合等离子刻蚀均提出了很高的要求。特别是对于双缝隙波导,相比于一般微纳波导,它额外地增加了四个侧壁,由侧壁粗糙引起的散射也进一步增强了,因而缝隙波导的传播损耗通常高于一般波导。

实验中,使用的SOI片参数:220 nm厚的上层硅层,3 μm 厚的二氧化硅层。首先,为了使光刻后的波导尺寸尽可能地接近于我们的设计结果,需要反复测试得到较好的曝光参数。并且在取得尺寸变化的经验参数后,通过掩模版图的设计来进行补偿。感应耦合等离子刻蚀的难度不仅在于对波导尺寸的影响,不同的刻蚀气体、保护气体以及射频功率,均会导致波导出现正梯形或者倒梯形的结构,同时对波导的侧壁粗糙度有很大的影响。在工艺中,主要对 SF_6/O_2 、 C_4F_8 、 F^+ 的气体浓度及配比以及射频功率和刻蚀时间等5个参量进行调节。图4所示是最

终得到的调制器硅基结构的 SEM 图。从图中可知，波导结构较好，并且与缝隙宽度与设计参数相差小于 15 nm。接下来我们会探索聚合物填充和电极制作工艺步骤，最终制备出本文所提出的调制器。

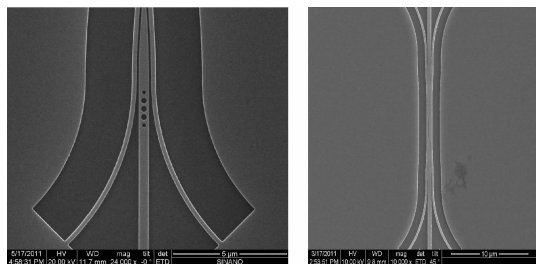


图4 光子晶体谐振器 SEM 图

Fig. 4 SEM image of the photonic crystal microresonator

5 结论

本文提出了一种新的基于双缝隙结构的硅-聚合物混合电光调制器。它是由一对一维光子晶体反射镜形成的谐振腔构成。通过在两侧波导上加电压改变双缝隙内高非线性聚合物的折射率从而达到调制效果。利用 BPM 和 FDTD 的仿真优化了结构设计参数，并对硅波导以及谐振器部分进行了初步工艺制备探索，制备出了与设计较为一致的波导谐振器结构。

参考文献

[1] Q Xu, S Manipatruni, B Schmidt, *et al.* 12.5 Gbit/s

carrier-injection-based silicon micro-ring silicon modulators[J]. *Optics Express*, 200, 15: 430-436.

[2] J Liu, M Beals, A Pomerene, *et al.* Waveguide-integrated, ultralow-energy GeSi electro-absorption modulators[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2: 433-437.

[3] J E Roth, O Fidaner, E H Edwards, *et al.* C-band side-entry Ge quantum-well electroabsorption modulator on SOI operating at 1 V swing[J]. *Electronics Lett*, 2008, 44: 49-50.

[4] A Liu, L Liao, D Rubin, *et al.* High-speed optical modulation based on carrier depletion in a silicon waveguide[J]. *Optics Express*, 2007, 15: 660-668.

[5] W M Green, M J Rooks, L Sekaric, *et al.* Ultra-compact, low RF power, 10 Gb/s silicon Mach-Zehnder modulator [J]. *Optics Express*, 2007, 15: 17106-17113.

[6] C Gunn, A Narasimha, B Analui, *et al.* A 40 Gbps CMOS Photonics Transceiver [C]. *SPIE*, 2007: 64770N-1.

[7] P Dong, S Liao, D Feng, *et al.* Low V_{pp} , ultralow-energy, compact, high-speed silicon electro-optic modulator [J]. *Optics Express*, 2009, 17: 22484-22490.

[8] X Xu, H Xu, Z Fan, *et al.* Mach-Zehnder electro-optic modulator based on silicon nanophotonic waveguide[C]. *SPIE*, 2009: 751600C-75160C-5.

[9] M Lipson. Compact electro-optic modulators on a silicon chip[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron*, 2006, 12: 1520-1526.

[10] L Zhou, K Okamoto, S J B Yoo. Athermalizing and trimming of slotted silicon microring resonators with UV-sensitive PMMA upper-cladding[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21: 1175-1177.

Design and Process Implement of EO Modulator Based on the Dual-Slot Structure

XIE Jing-ya ZHOU Lin-jie LI Xin-wan SUN Xiao-meng CHEN Jian-ping

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract With the development of microelectronics, metal interconnect has become the major limitation for the further improvement of the integrated circuits performance, due to the relatively low bandwidth, high delay and large power consumption of metal wires. Optical interconnect is one of the feasible solution for the next generation integrated circuits. Optical modulator, as a basic building block for optical interconnect, has attracted much research interest in recent years. In this paper, we propose a novel dual-slot silicon electro-optic modulator, consisting of a Fabry-Perot microresonator in a waveguide. The modulation is enabled by using the high linear electro-optic effect in the polymer material filled in the slots. To reduce the mode conversion loss and to simplify the electrode design, a mode converter is used to connect the regular silicon ridge waveguide to the dual-slot waveguide. The device performances are analyzed using numerical simulations and optimum design parameters are given. We also present the preliminary fabrication results for the device with SEM images showing that waveguide width, etch depth and side wall roughness can be well controlled using CMOS fabrication facilities.

Key words EO modulator; slot waveguide; microresonator; photonic crystal