

文章编号:1672-3392(2011)05-0020-05

高局域性的可调硅基混合表面等离子体光相位调制器

孙晓萌 周林杰 李新碗 谢静雅 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 设计和分析了一种可调硅基混合表面等离子体相位调制器。表面等离子体的引入打破了衍射极限的限制,使光场局域在一个纳米尺寸范围。该调制器的实现采用了两种原理:硅材料的等离子体色散效应以及聚合物的电光效应。由于器件结构的电容和寄生电阻较小,RC响应时间为3.77 ps,调制带宽大约100 GHz。当外加2.5 V的驱动电压时,该调制器的功耗为0.9 mW(相当于9 fJ/bit)。光相位调制器在光通信和光互联中都有重要应用。

关键词 表面等离子体;等离子体色散效应;电光效应;相位调制器

中图分类号 TN15 **文献标识码** A

1 引言

随着光信号处理及片上光互连的不断发展,器件的微型化和高速化成为研究的必然趋势,硅基光电子器件得到了重大的发展。然而,由于衍射极限的限制,传统介质集成光学器件在小型化和集成化方面遇到“瓶颈”。表面等离子体的引入可以打破衍射极限,减小器件尺寸,从而增加集成密度。表面等离子体激元是由于与金属中自由电子的震荡耦合作用而在金属与介质表面形成的沿界面传输的表面波,电场在界面处达到最大,沿着两边介质呈指数衰减。跟常规介质的波相比,表面等离子体波具有较高的场局域性,较大的相速度,较短的波长,较高的动量^[1, 2]。表面等离子体波导分为许多不同的类型,包括金属V型槽波导,金属-绝缘体-金属(MIM)波导,绝缘体-金属-绝缘体(IMI)波导以及介质条波导等^[3]。然而,到目前为止,大部分的表面等离子体波导都是无源器件,传播常数不能改变,这在很大程度上限制了表面等离子体波导的应用。

本文提出了一个新型的硅基混合表面等离子体相位调制器。该调制器为金属-介质-硅的结构,可以很好地把光场限制在纳米尺寸的介质层中。通过外加电压,利用硅材料的等离子体色散效应^[4]以及聚合物中的直接电光效应使得混合表面等离

子体波导的有效折射率可以调节,从而改变相位。设计的混合表面等离子体波导与传统的介质波导自然连接,更有效地与硅基光电子器件相兼容。

2 表面等离子体波导结构

图1(a)为提出的表面等离子体波导结构图,图1(b)为该波导的截面图,包括硅(Si)、二氧化硅(SiO₂),和银(Ag)三层,其中上层氧化硅的厚度设计得较厚以减小金属损耗。

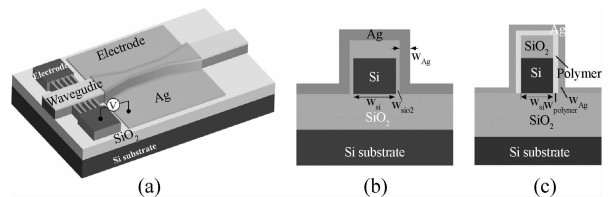


图1 (a)表面等离子体相位调制器的结构图;
(b)和(c)为表面等离子体波导的截面图;
[其中(b)利用自由载流子等离子体色散效应机制]
(c)利用聚合物的电光效应机制

Fig. 1 (a) Schematic perspective view of the proposed plasmonic phase modulator;
(b) and (c) Cross-sectional view of the active plasmonic waveguide based on
(b) free carrier plasma dispersion effect in silicon ; (c) electro-optic effect in polymer

收稿日期 2011-07-02; 收到修改稿日期 2011-08-20

作者简介 孙晓萌(1984—),女,博士,主要研究方向为集成光电子。E-mail: sunxiaomeng@sjtu.edu.cn

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

所研究的几何参数都标识在图上,其中 W_{Si} 、 W_{SiO_2} 和 W_{Ag} 分别代表 Si、SiO₂ 和 Ag 三层的宽度。在 1550 nm 波段,Ag 的介电常数 $\epsilon_{\text{Ag}} = -133.75 + 3.337i$,Si 和 SiO₂ 的折射率分别为 $n_{\text{Si}} = 3.48$, $n_{\text{SiO}_2} = 1.46$ ^[5]。由于整个硅波导外层覆盖着二氧化硅层,我们设计了指状的连接桥用以连接中心硅层与外界电极^[6]。

为了有效地调制表面等离子体模式,其中一种有效的方法是利用硅材料的等离子体色散效应来改变折射率。在外加电压的作用下,自由载流子在靠近氧化层的边缘有积累或者耗尽的趋势,图 2(a)为仿真的横电场模式的电场图,其中 $W_{\text{SiO}_2} = 10$ nm。对于介质波导,由于全反射原理,光被很强烈地限制在折射率高的介质层中。然而,本文所提出的表面等离子体波导能有效地把光局域在两边低折射率的介质层中。由于氧化硅和银层接触面的表面等离子体效应以及硅和氧化硅层接触面的高折射率差引起的电场不连续,光被很好地局域在纳米量级的氧化硅层中。氧化层的宽度对表面等离子体模式有着很重要的作用,我们采用有限元分析方法和复折射率 $n_{\text{eff}} = n_{\text{re}} + in_{\text{im}}$ 的计算方法研究了氧化层的宽度对模式的影响。其中,折射率的实部和虚部分别与表面等离子体波传输和损耗 $\text{LOSS} =$

$20\log(e)k_0n_{\text{im}}$ 有关, k_0 为自由空间的波数。其他的参数我们设定为 $W_{\text{Si}} = 100$ nm, $W_{\text{Ag}} = 10$ nm,上层氧化硅的厚度为 150 nm。图 2(b)为有效折射率和传输损耗与 W_{SiO_2} 的曲线图。当 $W_{\text{SiO}_2} = 0$ nm 时,传统的表面等离子体模式就在硅层和银层的接触面产生。随着氧化层的厚度增加,由于更多的能量分布在氧化层中,同时金属层中的能量减小,有效折射率的实部和虚部同时减小。因此,为了更有效地利用等离子体色散效应来调节表面等离子体模式,需要使用较薄的氧化层。

如图 2(a)所示,表面等离子体波导通过两个同样镀金属膜的过渡梯形波导与两边的脊形硅波导相连接。起初,光能量很好地局域在脊形硅波导中心,当过渡波导的截面逐渐减小,光能量缓慢的过渡到两边纳米量级的氧化硅层中。过渡波导的尺寸越长,模式转换的损耗就越小,但同时金属损耗也就越大,所以存在一个最佳的过渡长度来达到最高的耦合效率。图 2(c)为三维仿真的耦合效率与过渡波导长度的曲线图。当长度为 510 nm 时,最大的耦合效率为 88%。图 2(d)为整个波导电场传输的俯视图,图中显示过渡区域呈现较低的后向反射和散射,模式从脊型硅波导平缓的过渡到表面等离子体波导中。

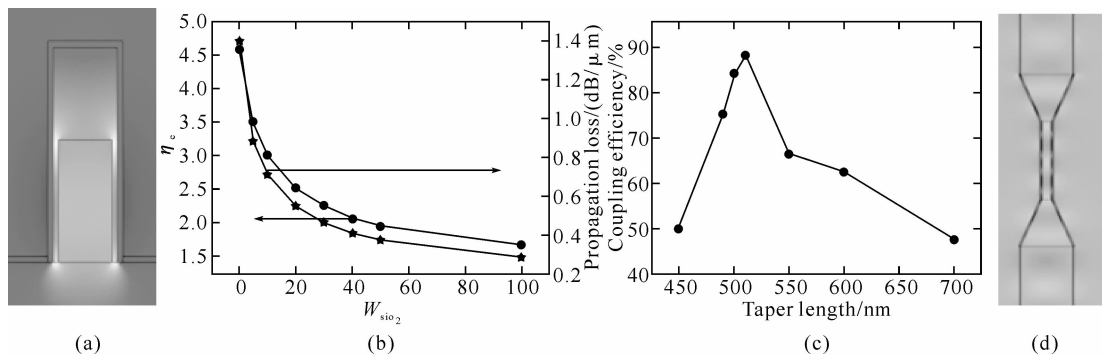


图 2 (a) 表面等离子体横电场模式仿真图;(b) 有效折射率和传输损耗与 W_{SiO_2} 的曲线图;
(c) 耦合效率与过渡波导长度的曲线图;(d) 整个波导电场传输的俯视图
(波导的参数为 $W_{\text{Si}} = 100$ nm, $h_{\text{Si}} = 200$ nm, $W_{\text{SiO}_2} = 10$ nm, $W_{\text{Ag}} = 10$ nm)

Fig. 2 (a) Simulated electric-field mode pattern for the plasmonic waveguide;
(b) Effective refractive index and propagation loss vs. sidewall oxide width;
(c) Coupling efficiency vs. taper length;
(d) Electric-field pattern showing the coupling from silicon waveguide to plasmonic waveguide
(Waveguide parameters are chosen as $W_{\text{Si}} = 100$ nm, $h_{\text{Si}} = 200$ nm, $W_{\text{SiO}_2} = 10$ nm, $W_{\text{Ag}} = 10$ nm)

接下来,我们讨论表面等离子体模式对于外加电压的响应。对于表面等离子体模式,虽然大部分的光能量都被局域在两边的氧化层中,但还是有一部分分布在中心硅层中。当自由载流子在中心硅

层中注入或者抽出,硅层的折射率将会发生变化,相应的表面等离子体模式也会变化。根据驱动电压的正负和大小,存在着 3 种工作机制:载流子积累,载流子耗尽和载流子反型。以掺 n 型杂质为

例,图 3(a)~3(c)分别给出了自由载流子在这 3 种机制作用下的情况。对于一个正向电压,载流子向两边氧化层边缘积累,有效折射率相应减小^[4]。电子积累层的厚度由德拜长度(Debye length)^[7]决定。对于一个较小的负向电压,氧化层边缘形成耗尽层。逐渐增加负压的强度,空穴逐渐产生且积累。载流子的耗尽与反型两种机制同样可以改变有效折射率。图 3(d)和 3(e)为自由载流子积累和反型两种机制下的浓度分布。其中,最初的掺杂浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。图 3(f)为有效折射率与电压

变化的曲线图。从图中可以看出当外加正向电压,有效折射率整体减小;当外加负向电压,有效折射率在电子的耗尽与空穴的积累作用下,先微小增加随后减小。在 5 V 的驱动电压下,有效折射率的变化 $\Delta n_{\text{re}} = -0.0043$,相应的对于 $10 \mu\text{m}$ 长度的表面等离子体波导产生了 10° 的相移,损耗为 7.2 dB。值得注意的是对于折射率改变较小的情况,可以用谐振结构,比如微环谐振器,光子晶体腔等来增强传输敏感性^[8]。

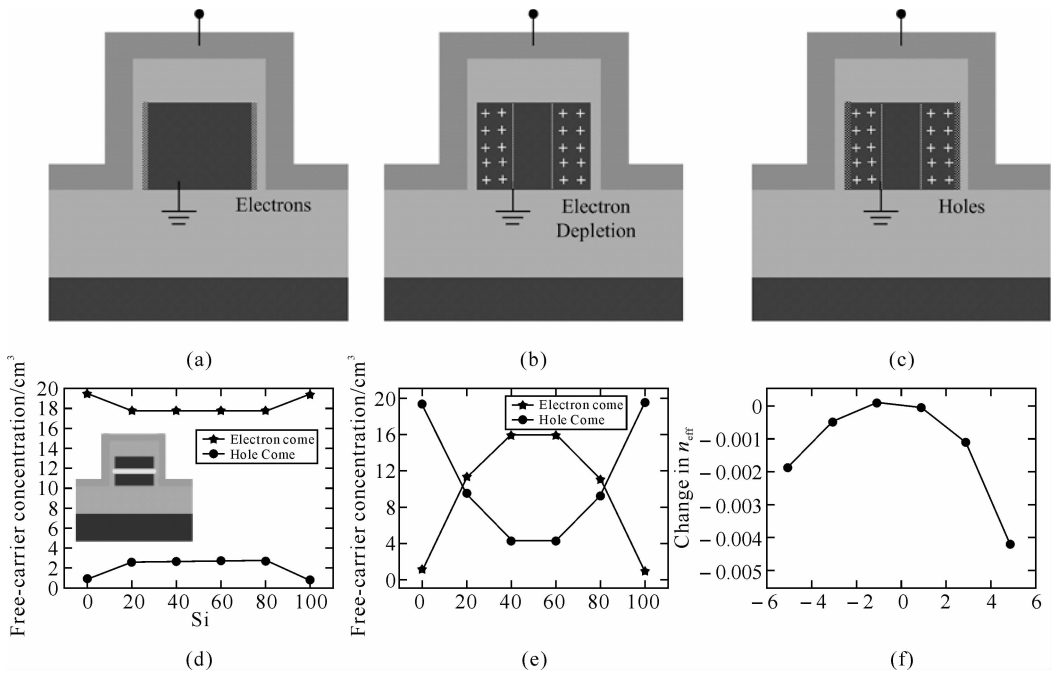


图 3 (a)~(c)三种工作机制下的情况;(d)和(e)硅中自由载流子的分布;
(f)有效折射率与电压变化的曲线图

Fig. 3 (a)~(c) Three working regimes under properly applied voltages; (d) and (e) Free-carrier distribution in the silicon waveguide core region; (f) Effective refractive index change vs. applied voltage

上面所说的等离子体色散效应较弱,有效折射率改变也很有限,因而只能引起较小的相位调制。为了增强调制效果,我们采用了另一种方法,即用聚合物代替氧化硅层。因此,混合表面等离子体波导可以充分利用聚合物的电光效应作为一个高速、低功耗的光调制器^[9],截面图如图 1(c)所示。当外加电压时,由于聚合物很强的二阶非线性电光效应使得极化聚合物的折射率发生变化,有效折射率随之变化,从而引起了相位的改变。非线性聚合物通常有着较高的电阻,大约 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ ^[10],因此金属和硅层可以有效地被隔离,同时可以作为两个电极。我们使用有着较大电光系数的聚合物^[11],该聚合物有着 $>200 \text{ pm/V}$ 的电光系数 r_{33} 和较好的

稳定性。聚合物的折射率随外加电场 E 的改变公式为^[12]

$$\Delta n = -r_{33} n_{\text{polymer}}^3 E / 2 \quad (1)$$

$$E = U / W_{\text{polymer}} \quad (2)$$

这里, U 是外加在聚合物层的电压。

考虑到工艺的可行性以及调制效率,器件的几何参数可以设定为 $W_{\text{Si}} = 100 \text{ nm}$, $W_{\text{polymer}} = 20 \text{ nm}$, 和 $W_{\text{Ag}} = 10 \text{ nm}$ 。图 4 所示是一个 $13 \mu\text{m}$ 相位调制器的相移改变随着电压变化的曲线图。在 2.5 V 外加驱动电压的条件下,有效折射率实部的改变为 -0.06 ,相当于一个 π 相位的改变。该相位调制器的插入损耗为 10 dB,其损耗主要来自于混合表面等离子体模式的传输损耗。

一般来说,聚合物的固有响应时间在飞秒量级^[13],它的冲放电时间决定了器件的调制速率。硅波导中若掺入硼(浓度在 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$),电阻率 $r=4 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。掺杂的混合表面等离子体波导的传输损耗大约在 0.828 dB/mm ,其中大约 0.6 dB/mm 的损耗来自于金属吸收,其余的来自于自由载流子。如图1(a)所示(聚合物代替了氧化硅),硅波导的输入和输出端都连接在同一个电极上,有效地减小了电阻,增大了调制速率。该调制器的寄生电阻来自于混合表面等离子体波导、过渡波导、两端硅波导和指状连接桥波导。电阻 $R=\rho l/s=1.3 \text{ KV}$,电容 $C=\epsilon s/d=2.9 \text{ fF}$,其中, ρ 是硅层的电阻率, l 和 s 分别是硅层的长度和横截面积, ϵ 为聚合物的介电常数, d 和 s 分别是聚合物电容层的正对面积和厚度。因此,RC响应时间为 3.77 ps ,调制带宽大约 100 GHz 。当外加 2.5 V 的驱动电压,调制频率为 $f=100 \text{ GHz}$ 时,该调制器的功耗 $P=0.5fCV^2=0.9 \text{ mW}$ (相当于 9 fJ/bit)。相比较其他的调制器结构,比如光子晶体波导、狭缝波导等^[10, 12],我们提出的混合表面等离子体波导结构同时具有小尺寸、高速率、大带宽以及低功耗等特点,可以满足未来光通信及互联的应用。

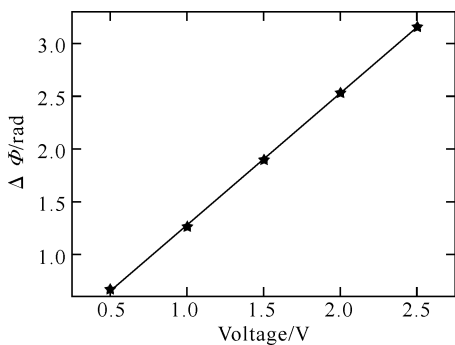


图4 相位改变与电压变化的曲线图

Fig. 4 Phase shift of a $13 \mu\text{m}$ -long plasmonic waveguide versus drive voltage

3 工艺制造可行性

该相位调制器可以采用现有的CMOS技术来实现。我们用硅-聚合物混合表面等离子体结构为例,给出一套可行的工艺方案。首先,使用等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)在标准的SOI材料上淀积一层二氧化硅。用电子束光刻(EBL)和反应离子刻蚀(RIE)的方法把图形转移到二氧化硅上,这层同时也作为掩模层应用到下面硅层图形的转移中。硅层的掺杂可用离子注入的方法实现。

接下来使用分子束外延(MBE)技术形成聚合物,同时可精确控制厚度。我们可第二次使用电子束光刻使聚合物只覆盖到表面等离子体波导的部分。最后,我们可使用溅射(Sputtering)及金属剥落(Lift-off)的方法形成金属层。值得注意的是为了增强聚合物的电光效应,需要对聚合物进行极化过程。

4 结论

本文提出和分析了一个新型的可调硅基混合表面等离子体相位调制器,光场被有效地局域在一个纳米尺寸范围。通过硅材料的等离子体色散效应以及聚合物的直接电光效应的应用,在外加电压的条件下,表面等离子体模式的有效折射率发生改变,从而实现了相位调制。该结构为实现硅基器件集成及表面等离子体器件提供了参考。

参考文献

- [1] A Boardman. Electromagnetic surface modes [M]. New York: Wiley, 1982.
- [2] V Agranovich, D Mills. Surface polaritons: electromagnetic waves at surfaces and interfaces[J]. Journal of the Optical Society of America B Optical Physics 1984, (1): 410.
- [3] D Gramotnev, S Bozhevolnyi. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. Nature Photonics, 2010, (4): 83-91.
- [4] R Soref, B Bennett. Electrooptical effects in silicon [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23 (1): 123-129.
- [5] P Johnson, R Christy. Optical constants of the noble metals[J]. Physical Review B, 1972, 6(12): 4370-4379.
- [6] G Wang, T Baehr-Jones, M Hochberg, et al. Design and fabrication of segmented, slotted waveguides for electro-optic modulation [J]. Applied Physics Letters, 2009, 91(14): 143109.
- [7] S Sze, K Ng. Physics of semiconductor devices[M]. New York: Wiley Blackwell, 2007.
- [8] Q Xu, B Schmidt, S Pradhan, et al. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator [J]. Nature, 2005, 435(19): 325-327.
- [9] Xiaomeng Sun, Linjie Zhou, Xinwan Li, et al. Design and analysis of a phase modulator based on ametal-polymer-silicon hybrid plasmonic waveguide [J]. Applied Optics, 2011, 50(20): 3428-3434.
- [10] T Baehr-Jones, B Penkov, J Huang, et al. Nonlinear polymer-clad silicon slot waveguide modulator with a half wave voltage of 0.25 V [J]. Appl. Phys. Lett., 2008, 92(16): 163303.
- [11] T D Kim, J W Kang, J D Luo, et al. Ultralarge

and thermally stable electro-optic activities from supramolecular self-assembled molecular glasses [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2007, 129(3): 488-489.

[12] J M Brosi, C Koos, L C Andreani, *et al.* High-speed low-voltage electro-optic modulator with a

polymer-infiltrated silicon photonic crystal waveguide[J]. *Opt. Express.*, 2008, 16(6): 4177-4191.

[13] L Dalton, *et al.* Organic electro-optic materials[C]. *SPIE*, 2004, 5621: 93-104.

Design and Analysis of a Phase Modulator Based on a Metal-Dielectric-Silicon Hybrid Plasmonic Waveguide

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

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,
Department of Electronic Engineering, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Electrically tunable silicon plasmonic phase modulators with nano-scale optical confinement are presented and analyzed in this paper. The modulation is realized based on two mechanisms: free carrier plasma dispersion effect in silicon and high electro-optic effect in polymer. Due to its small capacitance and parasitic resistance, the RC time is 3.77 ps, corresponding to a modulation bandwidth of ~ 100 GHz. At 2.5 V applied voltage, the power consumption is $P=0.9$ mW (or equivalently 9 fJ/bit). The phase modulators can be found potential applications in optical telecommunication and interconnect.

Key words surface plasmons; free carrier plasma dispersion effect; electro-optic effect; phase modulator