



DOI: 10.12086/oe.2018.180156

## 基于表面等离激元的偏振不灵敏型电光调制器的理论研究

靳琳<sup>1\*</sup>, 宋世超<sup>1</sup>, 文龙<sup>1</sup>, 孙云飞<sup>2</sup><sup>1</sup>中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所纳米器件与应用重点实验室, 江苏 苏州 215123;<sup>2</sup>苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009

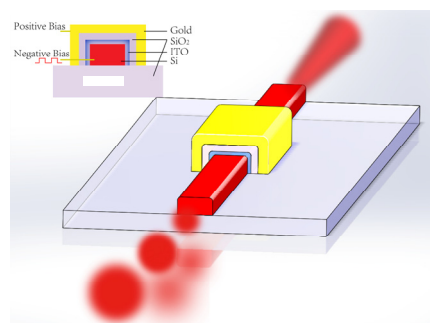
**摘要:** 由于受到表面等离激元(SPP)固有偏振性的影响, 基于表面等离激元的波导型调制器只支持横磁模式(TM)传播。本文提出了一种在垂直方向和水平方向上均构建混合(hybrid)波导结构的表面等离激元电光调制器, 以实现调制器的低偏振灵敏性。在组合的混合波导中, 垂直和水平偏振方向上的表面等离激元被限制在相应的混合波导中。通过调控介质和 ITO 界面处形成载流子积累层中载流子浓度可实现光吸收调制。在经优化的结构中两个偏振态的消光比差为 0.005 dB/ $\mu\text{m}$ 。通过 3D-FDTD 模拟调制器的光场调控, 清楚地显示了传统硅波导与偏振不灵敏调制器间的耦合传输特性。两种偏振态下, 偏振不灵敏调制器与硅波导之间的耦合效率均达到了 74%以上。此项研究将为表面等离激元电光调制器在偏振不灵敏光集成回路中的应用提供解决方案, 为其与具有偏振随机态光纤回路的集成奠定了基础。

**关键词:** 表面等离激元; 透明导电氧化物; 调制器; 偏振性

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

**引用格式:** 靳琳, 宋世超, 文龙, 等. 基于表面等离激元的偏振不灵敏型电光调制器的理论研究[J]. 光电工程, 2018, 45(11): 180156



## Theoretical investigation of surface plasmonic polariton-based electro-optical modulator with low polarization dependence

Jin Lin<sup>1\*</sup>, Song Shichao<sup>1</sup>, Wen Long<sup>1</sup>, Sun Yunfei<sup>2</sup><sup>1</sup>Key Lab of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China;<sup>2</sup>School of Electronic & Information Engineering, Suzhou University of Sciences and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China

**Abstract:** Plasmonic modulators essentially support only transverse magnetic mode. A plasmonic modulator consisting of hybrid plasmonic waveguides in both vertical and horizontal directions is proposed to reduce the polarization-dependence. In a combined waveguide, surface plasmon polariton (SPP) modes polarized in the vertical and horizontal directions exist in the correspondingly oriented hybrid plasmonic waveguide. The light modulation is investigated by tuning the carrier density of the accumulated layer where occurs at the dielectric-ITO interfaces. In an

收稿日期: 2018-03-28; 收到修改稿日期: 2018-05-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(61405235)

作者简介: 靳琳(1983-), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事微纳光电子器件的研究。E-mail: ljin2012@sinano.ac.cn

optimized structure, a  $\Delta/\epsilon_{ER}$  (a difference between the extinction ratios of two polarization modes) under 0.01 dB/ $\mu\text{m}$  is demonstrated at ITO “ENZ”-state by simulation. The energy flux clearly shows the polarization-selective coupling between the polarized guided modes in the feeding silicon waveguide and those in the combined waveguide. Coupling efficiency above 74% is obtained for both polarizations. The proposed plasmonic combined modulator has a potential application in guiding and processing of light from a fiber with a random polarization state.

**Keywords:** surface plasmon polaritons; transparent conductive oxide; modulator; polarization

**Citation:** Jin L, Song S C, Wen L, *et al.* Theoretical investigation of surface plasmonic polariton-based electro-optical modulator with low polarization dependence[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(11): 180156

## 1 引言

随着光通信应用的发展,光子集成电路(photonic integrated circuits, PICs)在过去的几十年里取得了显著的成效。调制器作为光子集成电路中光学信号处理的主要器件之一发展尤为迅速<sup>[1]</sup>,例如基于自由载波色散效应(自由载流子等离子体影响材料光学参数的效应)的硅基马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)光调节器实现了高达 50 GHz 的调制速率<sup>[2]</sup>。然而,由于硅材料较小的调制效率,导致基于硅材料的调制器件较难实现小型化,例如一个 250  $\mu\text{m}$  长的器件其消光比仅为 4.2 dB/ $\mu\text{m}$ <sup>[2]</sup>。虽然可以通过谐振腔来减小器件的体积,但这通常会带来带宽和温度容差等方面的问题。

纳米等离激元概念的提出有效地解决了器件小型化的难题<sup>[3]</sup>。“PlasMOStor”作为第一个基于等离激元的电光调制器,其主要原理是利用金属-氧化物半导体(MOS)的几何结构实现多模干涉,实现了器件高达 5 dB/ $\mu\text{m}$  的消光比,较传统硅基调制器的调制效率高两个数量级<sup>[4]</sup>。然而,文献报道其插入损耗高达 12.8 dB,严重限制其在光通信领域中的应用。另外,其他基于硅载流子色散作用的超紧凑表面等离激元调制器也被陆续报道出来。由于受到表面波的横磁波(TM,电场方向)传播方向的限制,目前所报道的基于表面等离激元的光调制器仅能支持 TM 偏振方向传播,其在偏振不敏感光网络中存在较大的局限性。

本文设计了一种基于 ITO 材料的偏振不灵敏电光调制器。通过构建全包覆复合波导结构使其在纵向和横向两个偏振方向上同时支持表面等离激元的传播,通过优化结构减小纵向和横向模式间的有效折射率差可实现偏振不灵敏电光调制。

## 2 调制原理

近几年,具有介电常数电调特性的透明导电氧化物(transparent conductor oxides, TCOs),如铟锡氧化物

(indium tin oxide, ITO),氧化铟铝和氧化铟镓等,作为一种新型的电光材料成为学者们的研究热点<sup>[5-9]</sup>。与硅基金属-氧化物-半导体(metal-oxide-semiconductor, MOS)场效应类似,在外加电压作用,TCOs 材料层在与介质层接触的界面处可以迅速形成载流子积累区或者耗尽区,通过外加偏压可调控积累区或耗尽区载流子的浓度,进而实现 TCOs 介电常数(折射率)的改变。当 TCOs 材料层介电常数实部接近零时,定义其为介电常数近零态(epsilon-near-zero, ENZ)。介电常数近零态能极大程度上增强光场与电光材料层的重叠积分提高光吸收调制效率,因此大多数基于 TCOs 材料的电光调制器通常采用狭缝波导或混合表面等离激元波导结构来构建 MOS 电容器结构,并通过施加适当电压以获得 TCOs 材料介电常数近零态,从而实现电吸收调制。

在本文中,选取 ITO 材料作为电光调制器中活性材料,研究在其 ENZ 态下的光场调控效应。在之前的工作中,已经确认了 ITO 的折射率随 MOS 结构中 ITO/介质层界面的载流子积累层的变化而显著改变<sup>[5,9]</sup>,其介电常数符合 Drude 模型:

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} - \frac{N_{\text{ITO}} e^2}{\epsilon_0 m^*} \cdot \frac{1}{\omega^2 + i\omega\Gamma}, \quad (1)$$

其中: $\epsilon_{\infty}$ 为高频介电常数( $\epsilon_{\infty}=3.9$ ), $\Gamma$ 是载流子散射率( $\Gamma=1.8 \times 10^{14}$  rad/s), $\omega$ 是角频率, $N_{\text{ITO}}$ 是 ITO 材料的电子浓度, $m^*$ 是载流子有效质量( $m^*=0.35m_0$ , $m_0$ 为电子质量, $m_0=9.31 \times 10^{-31}$  kg), $e$ 是电子电荷( $e=1.6 \times 10^{-19}$  C), $\epsilon_0$ 是自由空间介电常数( $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$  F/m)<sup>[10]</sup>。随着载流子浓度的增加,ITO 介电常数实部由正(介质态)到负(类金属态),反之亦然。同时,载流子浓度的增加也导致了 ITO 介电常数虚部的增加。当 ITO 介电常数实部达到 0 时,由于光场强限制的影响此时具有最大吸收损耗<sup>[11]</sup>。基于托马斯-费米散射理论(Thomas-Fermi screening theory),载流子积累层中载流子浓度极值位于 ITO 与介质层界面处,当

逐渐远离界面处后载流子浓度迅速降低。这一结果对 ITO 载流子积累层的厚度与 ITO 层的厚度的取值有明显限定,电容诱导的电子积累层只有 1 nm 厚<sup>[12-13]</sup>,并且已由文献[10]实验证实。因此,在我们的模拟中,载流子积累层的厚度被设定为 1 nm。

### 3 电光调制器结构

在本文中设计了一种偏振不灵敏电光调制器,其结构如图 1 所示,在宽( $W_{Si}$ )为 310 nm,高度( $H_{Si}$ )为 340 nm 的硅芯波导外侧依次覆盖 ITO 层、 $SiO_2$  层和金层。其中 ITO 薄层厚度( $D_{ITO}$ )为 10 nm,波导上层  $SiO_2$  的厚度为  $H_p$ ,波导两侧  $SiO_2$  的厚度为  $W_p$ ,金层厚度为 100 nm。图 1 为器件的结构图,器件的纵向结构为金-二氧化硅-氧化铟锡-硅,横向结构为金-二氧化硅-氧化铟锡-硅-氧化铟锡-二氧化硅-金,在横向和纵向构成金属-介质-硅混合(hybrid)波导结构。

采用时域有限差分(finite-difference time-domain, FDTD)方法对电光调制器进行模拟建模分析。考虑到 ITO 积累层厚度仅为 1 nm,模拟采用非均匀网格,最

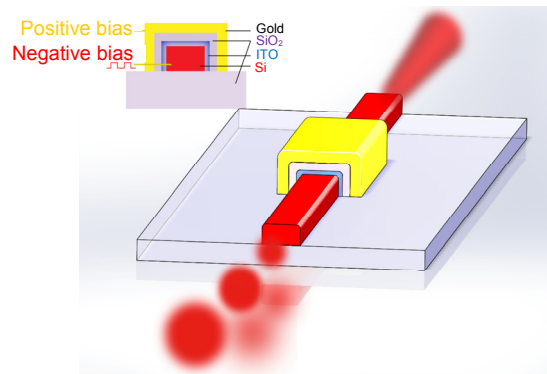


图 1 基于表面等离激元电吸收调制器 3D 图。插图 为调制器的截面图

Fig. 1 3D view of the proposed EA plasmonic modulator. Inset is the cross-section of the modulator

小网格为 0.2 nm。器件工作波长为 1.55  $\mu\text{m}$ 。硅和二氧化硅的折射率分别为 3.48 和 1.44,金层的介电常数为  $-116.62+11.46i$ ,  $H_p=20$  nm,  $W_p=25$  nm<sup>[14]</sup>。图 2(a) 和图 2(b)分别为器件未加电时 TE 模和 TM 的电场分布( $N_{ITO}=1.6\times 10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$ ,  $\mu_{ITO}=1.9838+0.0048i$ )。可以看出,

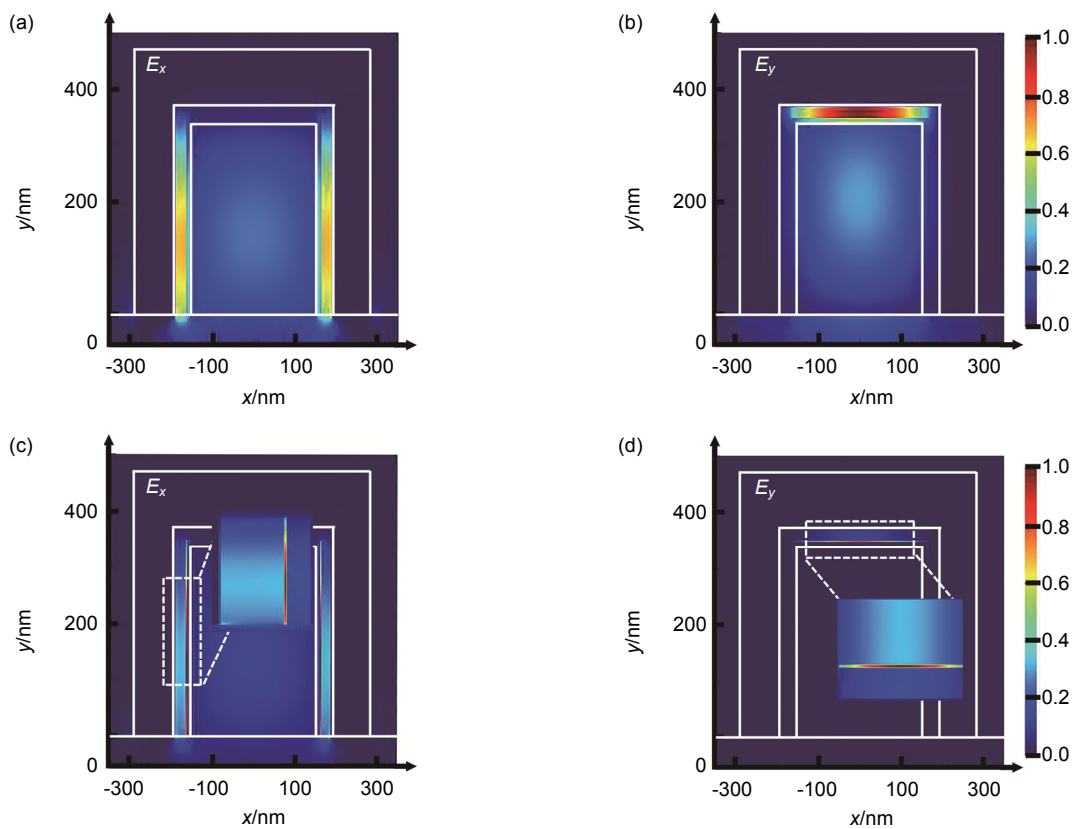


图 2 (a), (b) 分别为器件未加电时 TE 模和 TM 的电场分布; (c), (d) 分别为器件加电后 TE 模和 TM 的电场分布

Fig. 2 Electric field profiles  $E_x$  and  $E_y$  of the modulator for (a), (b) "ON" state, and (c), (d) "OFF" state, respectively

在 TE 偏振下, 电场主要限制在横向 hybrid 结构的侧壁 SiO<sub>2</sub> 层中; 同样, TM 偏振下, 电场主要限制在纵向 hybrid 结构的盖层 SiO<sub>2</sub> 层中, 这说明偏振不灵敏电光调制器可以同时支持 TE 和 TM 模式。图 2(c)和图 2(d)分别为器件加电时 TE 模和 TM 的电场分布 ( $N_{ITO}=6.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,  $n_{ITO}=0.5043+0.7122i$ ), 此时电场就要局域在横向 hybrid 结构的侧壁 ITO 载流子积累层中 (TE) 及纵向 hybrid 结构的盖层 ITO 载流子积累层 (TM)。该器件的金属/绝缘材料/硅 (MIS) 波导结构所具有的优异光学传播特性, 突破了衍射极限的限制, 实现了光场的强局域化及低损耗传播, 如所设计器件中光场可局域在几十纳米的介质层中进行传输。对于偏振不灵敏电光调制器中波导结构的设计在我们以前的工作中<sup>[15]</sup>已经进行了讨论, 本文主要讨论偏振不灵敏电光调制器的动态调制效应。

#### 4 数据分析

对于光调制器而言, 器件重要参数为消光比 (extinction ratio, ER, 用  $I_{ER}$  表示) 和插入损耗 (insertion loss, IL, 用  $I_{IL}$  表示), 其定义如下:

$$I_{ER} = \frac{P_{out}(V_b = V_{OFF})}{P_{out}(V_b = V_{ON})}, \quad (2)$$

$$I_{IL} = \frac{P_{in} - P_{out}(V_b = V_{ON})}{P_{in}}, \quad (3)$$

其中:  $P_{out}(P_{in})$  是器件输出(输入)的光功率,  $V_b$  代表开态 (“ON”-state,  $V_{ON}$ ) 和关态 (“OFF”-state,  $V_{OFF}$ ) 时的外加偏压。光学传输损耗 ( $\alpha$ ) 定义为  $\alpha=4\pi\kappa/\lambda$ ,  $\lambda$  为工作波长,  $\kappa$  为等离激元混合波导模式有效折射率的虚部。通过计算公式看出,  $\alpha$  主要依赖于载流子积累层的光学损耗。等离激元混合波导中的光场主要限制在低介电常数层 (SiO<sub>2</sub> 或 ITO 层), 因而可以通过改变 SiO<sub>2</sub> 厚度优化传输损耗。我们通过分析 SiO<sub>2</sub> 层厚度对两个偏振下的消光比差 ( $\Delta I_{ER}$ ) 的影响, 实现对等离激元混合波导传输损耗的优化, 结果如图 3 所示。TE 模式下, 由于波导模式与载流子积累层的重叠积分减小, 载流子积累层所引起的光吸收减小, 使得  $I_{ER}$  随二氧化硅侧向宽度 ( $W_p$ ) 的增加而逐渐减小。由于受到矩形硅波导和两个侧壁对光场分布影响, 当 SiO<sub>2</sub> 厚度  $H_p$  接近于侧向宽度  $W_p$  时, TE 与 TM 模式下消光比差 ( $\Delta I_{ER}$ ) 值最小。

图 4 分析了  $I_{ER}$  和  $\Delta I_{ER}$  随积累层载流子浓度变化的情况。通过改变外加电压实现 ITO 载流子积累层中载流子浓度的变化, 继而载流子积累层的介电常数随之发生变化, 从而实现了波导模式电场分布与载流子

积累层对光场吸收的调控。我们分析了载流子积累层中载流子浓度变化对电光调制器的影响, 如图 4(a) 所示。两个偏振模式下的消光比随着载流子浓度的增加而增加, 达到最大值后随着载流子浓度的增加而逐渐减小, 且 TE 和 TM 偏振下的最大消光比分别为 1.62 dB/ $\mu\text{m}$  和 1.59 dB/ $\mu\text{m}$ 。如图 4(b) 所示, 其  $\Delta I_{ER}$  随着载流子浓度的增加而增加并且在特定的载流子浓度达到最大值, 该特定的载流子浓度即 ITO 材料介电常数趋于零点时的载流子浓度, 此时两个偏振模式下的消光比差小于 0.01 dB/ $\mu\text{m}$ 。

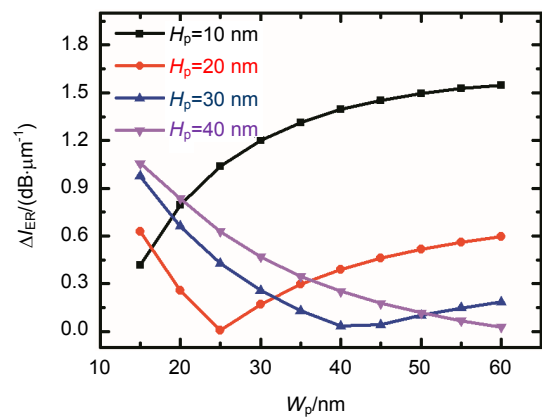


图 3 SiO<sub>2</sub> 层厚度对两个偏振下的消光比差的影响  
Fig. 3  $\Delta I_{ER}$  of the EA modulator versus  $W_p$  at  $H_p=10 \text{ nm}-40 \text{ nm}$

考虑到调制器为光子集成电路中重要组成部分之一, 需要与其他光学元件进行光回路集成, 故需考虑与回路中的硅波导耦合的问题。我们在本文中采用直接耦合方式, 并计算了调制器与硅波导的端面耦合效率。在开态时, TE 偏振下耦合效率为 80.5%, TM 偏振下耦合效率为 74.8%。两个偏态的耦合效率差在开态分别为 5.63% 和 6.38%。

采用 3D-FDTD 仿真软件模拟文章中所提到的电吸收型电光调制器。其中器件长度为 15  $\mu\text{m}$ , 在工作波长为 1.55  $\mu\text{m}$  的情况下, TE 和 TM 两个模式的光分别通过硅波导耦合进电光调制器中, 并沿调制器传输方向进行传输, 通过端面耦合的方法耦合进入输出波导。图 5(a) 和 5(b) 分别为 TE 模式传播时横向电场在开态和关态的分布情况; 图 5(c) 和 5(d) 分别为 TM 模式传播时横向磁场在开态和关态的分布情况。在关态 ( $N_{ITO}=6.1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,  $n_{ITO}=0.4871+0.7496i$ ), 由于两个偏振态的消光比差仅为 0.005 dB/ $\mu\text{m}$ , 两个偏振模式下光场在 15  $\mu\text{m}$  长的调制器中可实现低偏振灵敏度调制。

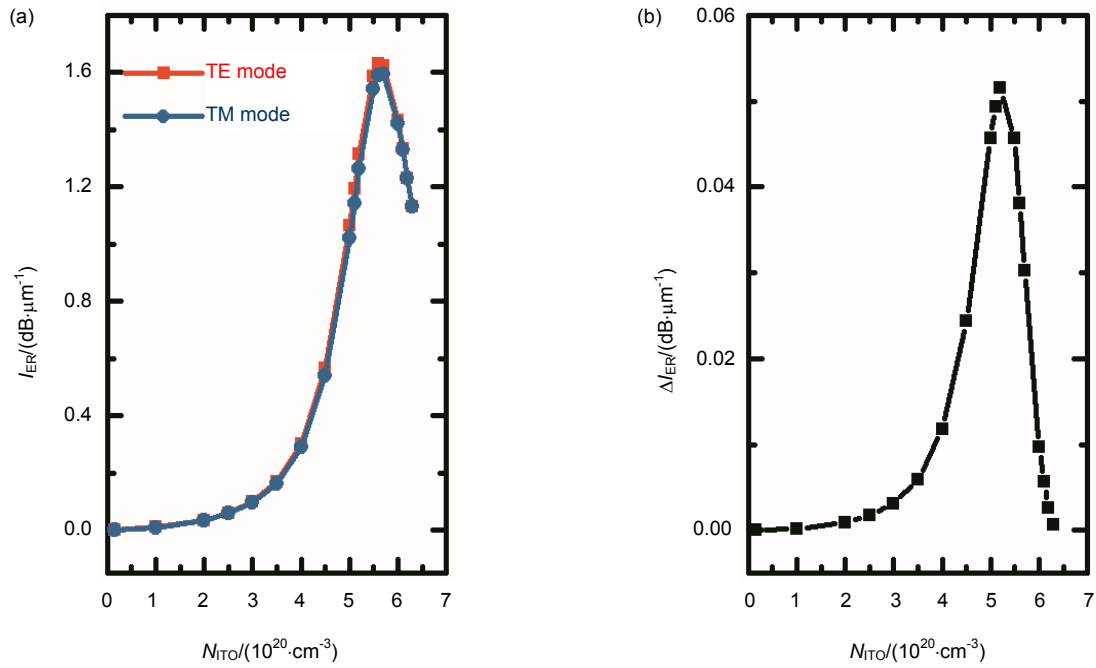


图 4 载流子积累层中载流子浓度变化对电光调制器  $I_{ER}$  (a)和  $\Delta I_{ER}$  (b)的影响

Fig. 4  $I_{ER}$  (a) and  $\Delta I_{ER}$  (b) as a function of average carrier concentration of ITO layer  $N_{ITO}$  for the EA modulator

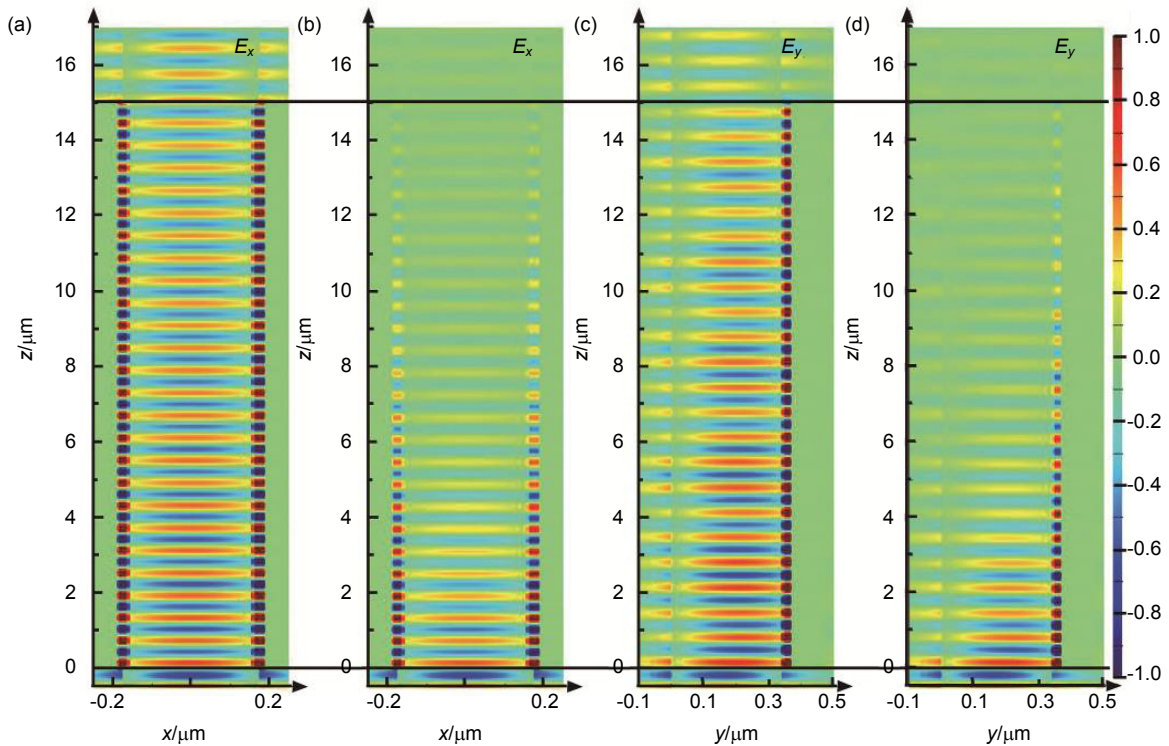


图 5 TE 模式传播时横向电场在开态(a)和关态(b)的分布情况; TM 模式传播时横向磁场在开态(c)和关态(d)的分布情况

Fig. 5 The field distributions of  $E_x$  for the TE mode (a),(b) and  $E_y$  (c), (d) for the TM mode along the  $y$ -cut and  $x$ -cut of the Si waveguide

## 5 结论

本文设计出了一种基于表面等离子激元的偏振不灵敏型电光调制器。该电光调制器在横向和纵向上分别存在混合型波导结构,因而可同时支持两个偏振模式。在所设计的波导型电光调制器结构中引入导电氧化物薄层,通过外加电压改变透明导电氧化物中载流子浓度,从而调节透明导电氧化物对光的吸收率,最终实现电吸收调制。通过进一步的结构优化,在 1.55  $\mu\text{m}$  的工作波长下,电光调制器在两个偏振态下的消光比差小于 0.005 dB/ $\mu\text{m}$ 。此外,两个偏振态下此调制器与传统硅波导的直接端面耦合效率均超过了 74%。由于所设计的基于表面等离子激元的偏振不灵敏电光调制器具有高消光比、端面耦合效率以及偏振复用等优异特性,因此该电光调制器为超紧凑光子集成电路的设计提供了一定程度上的可行性先导探究分析。

## 参考文献

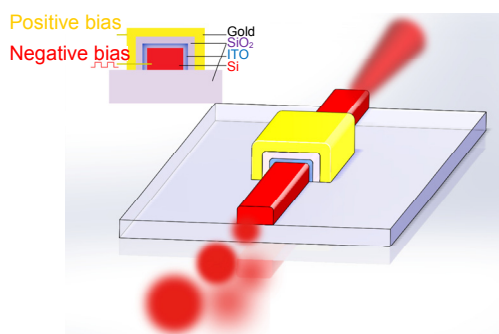
- [1] Pu M B, Yao N, Hu C G, *et al.* Directional coupler and nonlinear Mach-Zehnder interferometer based on metal-insulator-metal plasmonic waveguide[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(20): 21030–21037.
- [2] Akiyama S, Baba T, Imai M, *et al.* 50-Gb/s silicon modulator using 250- $\mu\text{m}$ -Long phase shifter based-on forward-biased pin diodes[C]//*Proceedings of the 9th International Conference on Group IV Photonics*, San Diego, 2012.
- [3] Pu M B, Wang C T, Wang Y Q, *et al.* Subwavelength electromagnetics below the diffraction limit[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(14):144101.  
蒲明博, 王长涛, 王彦钦, 等. 衍射极限尺度下的亚波长电磁学[J]. *物理学报*, 2017, **66**(14):144101.
- [4] Dionne J A, Diest K, Sweatlock L A, *et al.* PlasMOSStor: a Metal-Oxide-Si field effect plasmonic modulator[J]. *Nano Letters*, 2009, **9**(2): 897–902.
- [5] Feigenbaum E, Diest K, Atwater H A. Unity-order index change in transparent conducting oxides at visible frequencies[J]. *Nano Letters*, 2010, **10**(6): 2111–2116.
- [6] Traviss D, Bruck R, Mills B, *et al.* Ultrafast plasmonics using transparent conductive oxide hybrids in the epsilon-near-zero regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(12): 121112.
- [7] Noginov M A, Gu L, Livenere J, *et al.* Transparent conductive oxides: plasmonic materials for telecom wavelengths[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(2): 021101.
- [8] Lu Z L, Zhao W S, Shi K F. Ultracompact electroabsorption modulators based on tunable Epsilon-Near-Zero-Slot waveguides[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, **4**(3):735–740.
- [9] Sorger V J, Lanzillotti-Kimura N D, Ma R M, *et al.* Ultra-compact silicon nanophotonic modulator with broadband response[J]. *Nanophotonics*, 2012, **1**(1): 17–22.
- [10] Lee H W, Papadakis G, Burgos S P, *et al.* Nanoscale conducting oxide PlasMOSStor[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(11): 6463–6468.
- [11] Zhu S Y, Lo G Q, Kwong D L. Design of an ultra-compact electro-absorption modulator comprised of a deposited TiN/HfO<sub>2</sub>/ITO/Cu stack for CMOS backend integration[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(15): 17930–17947.
- [12] Krasavin A V, Zayats A V. Photonic signal processing on electronic scales: electro-optical field-effect nanoplasmonic modulator[J]. *Physical Review Letters*, 2012, **109**(5): 053901.
- [13] Vasudev A P, Kang J H, Park J, *et al.* Electro-optical modulation of a silicon waveguide with an "epsilon-near-zero" material[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(22): 26387–26397.
- [14] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, **6**(12): 4370.
- [15] Jin L, Chen Q, Song S C. Plasmonic waveguides with low polarization dependence[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(16): 3078–3081.

# Theoretical investigation of surface plasmonic polariton-based electro-optical modulator with low polarization dependence

Jin Lin<sup>1\*</sup>, Song Shichao<sup>1</sup>, Wen Long<sup>1</sup>, Sun Yunfei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Lab of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China;

<sup>2</sup>School of Electronic & Information Engineering, Suzhou University of Sciences and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China



3D view of the proposed EA plasmonic modulator. Inset is the cross-section of the modulator

**Overview:** Photonic integrated circuits (PICs) have made remarkable progress in the past few decades with the development of applications in the fields of optical communication, sensing, and imaging. Si photonics is deemed to be a promising solution for future high-speed on/off-chip optical interconnections. Typical Si waveguide modulators leverage electrically altering either the refractive or the absorptive properties of a material to modulate the transmission of light through a device. Due to the weak plasma dispersion effect of Si and the diffraction limit of the Si waveguides, the Si MZI modulators suffer from large footprints of  $\sim 103 \mu\text{m}^2 \sim 104 \mu\text{m}^2$ . Plasmonics provides an approach to miniaturize optical devices beyond the diffraction limit. Alternatively, fully CMOS-compatible plasmonic modulators using Si as an active material are demonstrated. Relying on the manipulation of the transverse magnetic (TM) mode excited on the metal-dielectric interface, most of the previous demonstrations are designed to respond only for specific polarization state. In this case, it will lead to a high polarization dependent loss, when the polarization sensitive modulator integrates to a fiber with random polarization state. Herein, we propose a plasmonic modulator utilizing a metal-oxide-indium tin oxide (ITO) wrap-around the silicon waveguide and investigate its optical modulation ability for both the vertical and horizontal polarized guiding light by tuning electro-absorption of ITO with the field-induced carrier injection. ITO was reported to have much larger variation of its dielectric constant. Similar to Si based field-effect, MOS device where carrier accumulation is formed under an applied voltage bias, carrier density (NITO) can be tuned at the ITO/dielectric interface with an applied bias. When the real part of the permittivity of the ITO material is tuned to near zero, at a certain NITO, which is referred as the “epsilon-near-zero” (ENZ) state, while it has the maximal absorption loss due to the strong confinement of the guided mode. By simultaneously optimizing the mode field confinement and the ITO carrier dispersion effect in these stacks, similar optical modulation performance can be achieved for both polarizations, which has not been reported in the previous work. In an optimized structure, a  $\Delta ER$  (a difference between the extinction ratios of two polarization modes) about  $0.005 \text{ dB}/\mu\text{m}$  is demonstrated at ITO “ENZ”-state by simulation. The energy flux clearly shows the polarization-selective coupling between the polarized guided modes in the feeding silicon waveguide and those in the combined waveguide. Coupling efficiency above 74% is obtained for both polarizations. The proposed plasmonic combined modulator has a potential application in guiding and processing of light from a fiber with a random polarization state.

**Citation:** Jin L, Song S C, Wen L, *et al.* Theoretical investigation of surface plasmonic polariton-based electro-optical modulator with low polarization dependence[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(11): 180156

Supported by National Natural Science Foundation Youth Fund (61405235)

\* E-mail: ljin2012@sinano.ac.cn