

基于高迁移率透明导电氧化物的高速、低插入损耗硅基光波导移相器研究

聂立夏^{1,2}, 张燕^{1,2}, 鲜仕林^{1,2}, 秦俊^{1,2}, 王会丽^{1,2}, 毕磊^{1,2*}

¹电子科技大学国家电磁辐射控制材料工程技术研究中心, 四川 成都 611731;

²电子科技大学电子科学与工程学院, 四川 成都 611731

摘要 硅基光波导移相器是硅基光电子系统的重要组成部分。透明导电氧化物(TCO)薄膜的介电常数受栅极电压作用会产生调谐,有望应用于下一代高速、低插入损耗且兼容 CMOS 的硅基光波导移相器中。TCO 较高的光吸收系数限制了其在移相器中的应用。提出了一种基于高迁移率的透明导电氧化物的低插入损耗硅基光波导移相器,并证明了 TCO 材料迁移率与其损耗密切相关。通过理论计算和数值仿真,设计了一种基于高迁移率氧化镉(CdO)材料($\mu=300\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)的硅基光波导移相器。所得器件在 1550 nm 波长实现 π 相移时,器件长度为 127 μm ,插入损耗为 1.4 dB,调制带宽可达到 300 GHz。为发展高速硅基光波导移相器提供了新思路。

关键词 光学器件; 移相器; 光电效应; 透明导电氧化物

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.152302

High-Speed and Low-Insertion-Loss Silicon Waveguide Phase Shifter Based on High Mobility Transparent Conductive Oxides

Nie Lixia^{1,2}, Zhang Yan^{1,2}, Xian Shilin^{1,2}, Qin Jun^{1,2}, Wang Huili^{1,2}, Bi Lei^{1,2*}

¹National Engineering Research Center of Electromagnetic Radiation Control Materials,

University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;

²School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

Abstract Silicon-based optical waveguide phase shifters are key components in silicon-based photoelectronic systems. Transparent conductive oxide (TCO) films are expected to be applicable to the next generation of silicon-based optical waveguide phase shifters with high modulation speed, low insertion loss, and CMOS-compatibility due to their tunable permittivity under a gate voltage. However, the high optical absorption coefficient of the TCO has limited their application in electro-optic phase shifters. We propose a compact and low-insertion-loss silicon-based optical waveguide phase shifter based on TCOs with high electron mobility. We demonstrate that the mobility of the TCO material is closely related to their insertion loss. Based on theoretical calculations and numerical simulations, we propose a silicon-based optical waveguide phase shifter based on high-mobility cadmium oxide (CdO, $\mu=300\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) materials. For π -phase shift at 1550 nm, this CdO-based phase shifter shows a low-insertion loss of 1.4 dB, device length of 127 μm , and modulation bandwidth of 300 GHz. It provides a new strategy for the development of high-speed silicon-based optical waveguide phase shifters.

Key words optical devices; phase shifters; electro-optical effect; transparent conductive oxides

OCIS codes 230.0250; 060.5060; 230.2090; 310.7005

收稿日期: 2019-01-28; 修回日期: 2019-02-21; 录用日期: 2019-03-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61475031)、国家自然科学基金优青项目(51522204)、科技部重点研发计划(2016YFA0300802)

* E-mail: bilei@uestc.edu.cn

1 引言

近年来,硅基光电子技术以其高速数据传输带宽、低功耗及与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容等优点支撑了集成光通信和光互连系统的发展^[1-3]。移相器作为硅基光电子芯片的重要器件,可应用于基于相位调制的光波导调制器等硅基光电子器件中,如激光雷达相控阵系统等^[4]。目前,硅基光波导移相器的移相机制主要有自由载流子色散效应(FCD)、热光效应(TO)和电光效应(EO)。其中,电光效应调制器通常采用硅集成的电光材料实现移相调制。但由于硅为中心对称晶体,不具备线性电光效应^[5],因此,需研究LiNbO₃^[6]等非CMOS兼容电光材料的异质集成技术^[7];基于等离子色散效应的硅基光波导移相器主要通过调制硅基光波导中硅材料的载流子浓度实现相位调制,其调制速度可达数GHz^[8]至数十GHz^[9],但这类移相器往往需要毫米级的长度才能获得 π 相移^[10];基于热光效应的相位调制器虽能实现高效相位调制,但由于基于欧姆加热的调制机制,此器件的响应时间通常在微秒量级,调制速度最高仅为MHz量级^[11]。因此,发展高速、低损耗、与CMOS兼容的硅基光波导移相器成为硅光电子领域的迫切需求。

透明导电氧化物(TCO)薄膜由于在电场作用下具有较大的折射率变化以及良好的CMOS兼容性,成为硅基光波导调制器的研究热点。典型的TCO材料包括氧化铟锡(ITO)、氧化锌(ZnO)、氧化锡(SnO)和氧化镉(CdO)^[12-13]等。通常,控制TCO薄膜的生长条件可调控其载流子浓度为 $10^{16} \sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$,其电子迁移率也会因工艺条件和TCO薄膜种类的不同而在 $10 \sim 1000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内变化^[14]。基于TCO材料的电光调制器的工作机理,是通过施加栅电压调节TCO的自由载流子浓度,从而实现对其折射率的调控。一种调制方式是通过调控载流子浓度,使TCO薄膜的介电常数实部接近零(ENZ)。由电磁场边界条件知,在ENZ区域的TCO材料可实现电场的局域增强,从而实现结构的较强光吸收和高效电光调制。到目前为止,大部分基于TCO的电光调制器是基于TCO材料在接近ENZ状态下有较强的光电吸收而制成的^[15-17];很少有利用TCO薄膜实部变化实现光学相位调控的报道,这主要是由于ITO等TCO薄膜材料的光吸收系数偏高,虽可有效实现相位调控,但由于器件的插入损耗

较高,达不到实际应用标准。例如,Sinatkas等^[18]报道了Si-HfO₂-ITO组成的金属-氧化物-半导体(MOS)电容结构光波导移相器,通过数值仿真计算得到实现幅度为 π 的相移时,器件长度为 $176 \mu\text{m}$,同时调制速度可突破 100 GHz ,但插入损耗高达 3.4 dB ,很难达到器件的应用要求。因此,研究不同TCO薄膜光学参数对移相器性能的影响,实现具有低插入损耗的高速TCO电光移相材料和光波导电光移相器是该领域的重要课题。

本文结合Drude模型、Thomas-Fermi理论和数值仿真,通过研究4种TCO薄膜(ITO、ZnO、SnO和CdO)材料的光学参数对硅基光波导电光移相器性能的影响,探索了TCO材料的性能参数,如有效质量、迁移率、带隙和介电常数等随电子浓度的变化关系及对移相器性能的影响。结果表明:当电子浓度变化相同时,介电常数实部变化量从小到大的顺序为ITO、SnO、ZnO、CdO,介电常数虚部变化量从小到大的顺序为CdO、ITO、SnO、ZnO。基于有限元仿真,研究了4种TCO薄膜硅基光波导移相器的性能。在实现 π 相位变化时,基于CdO材料的移相器器件长度最短,为 $127 \mu\text{m}$,同时单位吸收系数最低,仅为 $0.01107 \text{ dB}/\mu\text{m}$,插入损耗为 1.4 dB 。研究结果证明,TCO材料电子迁移率对其光波导移相器长度、调制带宽和插入损耗有重要影响,采用高迁移率TCO材料(如CdO薄膜)可以研制出高性能的硅基光波导移相器。

2 电控TCO材料的折射率调制和移相机理

TCO的介电常数可由Drude模型可得^[19-20],即

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \quad (1)$$

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m^*}, \quad (2)$$

式中: e 为电子电荷; m^* 为电子有效质量; ϵ_0 和 ϵ_{∞} 分别为真空介电常数和高频介电常数; ω 为光波的角频率;阻尼系数 $\gamma = e/(m^* \cdot \mu)$, μ 为电子迁移率; ω_p 为等离子体共振频率,与材料的电子浓度 N 直接相关。

在TCO的MOS电容结构中,外加正向偏置电压后,TCO与电介质界面处的电子浓度会逐渐累积。累积层电子浓度可由经典的Thomas-Fermi理论获得^[21]。本文采用界面单层模型和界面多层模型两种近似模型分析TCO材料介电常数的分布。

2.1 界面单层模型分析方法

界面单层模型是将 TCO 薄膜沿厚度方向分为两层折射率均匀的材料,即折射率随外场变化的界面累积层和折射率不随外场变化的块体层。通过将 TCO 界面累积层的载流子浓度等效成一个合理的近似值,可使其满足对 Thomas-Fermi 模型界面电荷分布的一级近似^[16]。再通过等效累积层的电子浓度和 Drude 模型,就可得到 TCO 界面等效层的介电常数。

$$n_{\text{acc}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_i}{qt} \cdot \frac{V_g}{d_{\text{acc}}}, \quad (3)$$

$$d_{\text{acc}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\kappa_B T \epsilon_0 \epsilon_s}{N_0 q^2}}, \quad (4)$$

式中: κ_B 为玻尔兹曼常数; q 为质子电荷; t 为电介质层厚度; ϵ_s 为 TCO 的相对静态介电常数; ϵ_i 为电介质的静态介电常数; T 为室温; V_g 为外加栅极电压; n_{acc} 和 d_{acc} 分别为注入的载流子浓度和等效累积层厚度; N_0 为 TCO 的初始载流子掺杂浓度。

2.2 界面多层模型分析方法

界面多层模型与界面单层模型相似,首先将 TCO 材料分为界面累积层和块体层,不同之处在于前者将界面累积层进一步分为多层结构,其中各层的电子浓度满足 Thomas-Fermi 理论在该层位置时的平均值。如果以 TCO-电介质的界面为坐标原点,则当 TCO 材料累积层某处与坐标原点纵向距离为 y 时,其注入的电子浓度随厚度变化的函数为^[21]

$$n(y) = N_0 \exp(\varphi_s / \varphi_T) = N_0 \sec^2[(y - t_{\text{acc}}) / (\sqrt{2} L_D)], \quad (5)$$

式中: φ_T 和 φ_s 分别为室温下的热势能和 TCO-电

表 1 4 种 TCO 材料的光学性能参数

Table 1 Optical performance parameters of four kinds of TCO materials

| TCO material | Band gap / eV | Effective mass m^* / m_e | Mobility $\mu /$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) | ϵ_∞ | Static dielectric constant ϵ_s | Reference |
|--------------|---------------|----------------------------|--|-------------------|---|-----------|
| CdO | 2.4 | 0.18 | 300 | 5.40 | 18.1 | [23] |
| ITO | 3.8 | 0.35 | 50 | 4.00 | 9.3 | [16] |
| SnO | 3.6 | 0.30 | 50 | 3.90 | 12.5 | [24] |
| ZnO | 3.4 | 0.28 | 35 | 3.85 | 8.3 | [25] |

通过 Drude 模型计得到 ITO、CdO、SnO 和 ZnO 的介电常数与电子浓度的关系,如图 1 所示。随着电子浓度增加,4 种 TCO 材料介电常数的实部变小(负),虚部变大。相比于其他材料,CdO 材料介电常数实部随载流子浓度变化最快,介电常数虚部随载流子浓度上升最慢,并且虚部数值较 ITO、

介质界面的表面势, $\varphi_T = \kappa_B T / q$; 德拜长度 $L_D = \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_s \varphi_T / (q N_0)}$ 。

$$t_{\text{acc}} = \sqrt{2} L_D \arccos[\exp(-\varphi_s / \varphi_T)], \quad (6)$$

式中: t_{acc} 为界面累积层厚度,通常为 1~3 nm,取决于初始掺杂浓度。TCO 界面的表面势 φ_s 与外加栅电压的关系满足

$$V_g = \varphi_s + \frac{q N_0 \sqrt{2} L_D t}{\epsilon_0 \epsilon_i} \left\{ \arccos \left[\exp \left(-\frac{\varphi_s}{\varphi_T} \right) \right] - \exp \left(\frac{\varphi_s}{\varphi_T} \right) \sqrt{1 - \exp \left(\frac{-2\varphi_s}{\varphi_T} \right)} \right\}. \quad (7)$$

对于低于电介质击穿电压的栅电压,通过(7)式可计算得到 φ_s ,它取决于初始掺杂浓度;再联合(5)、(6)式可解出界面电子浓度随坐标变化的曲线,从而由 Drude 模型得到界面 TCO 的介电常数。

3 结果与讨论

首先通过 Drude 模型计算了 4 种 TCO(ITO、ZnO、SnO 和 CdO)材料的介电常数随载流子浓度的变化关系。这 4 种 TCO 材料的基本光学性能参数,如带隙、有效质量、迁移率、高频介电常数和相对静态介电常数等见表 1^[22-28],其中 m_e 为电子质量。值得注意的是,这些参数值因工艺条件不同而异,例如,可以通过热处理和沉积技术有效提高 TCO 的迁移率,同时可以保证其具有较高的导电性和透明性^[29-30],但这并不影响本文模型的普适性。这 4 种 TCO 材料中,CdO 的迁移率明显高于其他 3 种,掺杂浓度约为 10^{20} cm^{-3} 时,CdO 的迁移率通常高于 $200 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[31];掺杂少量 Sn^{4+} 后,当电子浓度为 $4.7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 时,其迁移率可达 $609 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[22]。

SnO 和 ZnO 小。因此,基于 CdO 材料的电光移相器更有可能在同样器件长度下累积更多的相移,同时保持最小的吸收系数。

基于上述 TCO 材料的光学参数特性,设计了硅基光波导移相器,其结构如图 2(a)所示^[18]。硅基脊型波导的结构尺寸为 $W = 180 \text{ nm}$, $H = 250 \text{ nm}$,

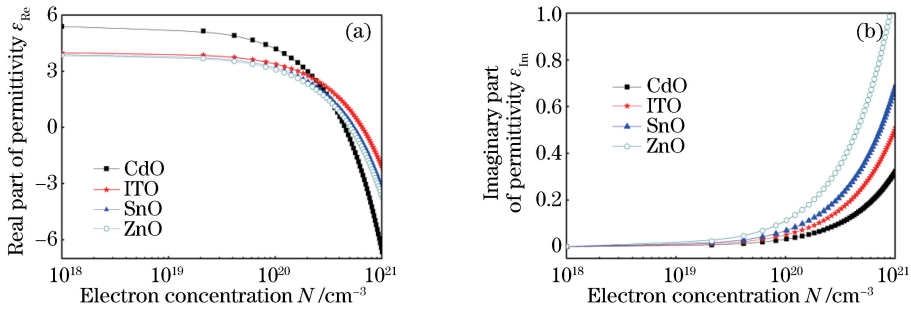


图 1 4 种材料的介电常数与电子浓度的关系。(a)实部;(b)虚部

Fig. 1 Permittivity as a function of electron concentration for four kinds of materials. (a) Real parts; (b) imaginary parts

$h = 30 \text{ nm}$, 波导底包层为 $3 \mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 。电介质为高静态介电常数二氧化铪 HfO_2 材料 ($\epsilon_i = 25$)^[32], 厚度为 5 nm , 在硅波导上沉积的 TCO 薄膜厚度为 10 nm , 顶部包层尺寸为 $w(\text{HfO}_2) = 500 \text{ nm}, d(\text{HfO}_2) = 200 \text{ nm}$ 。TCO- HfO_2 -Si 波导 MOS 电容结构部分的截面如图 2(b) 所示, 其中 TCO 材料可分为截面电荷累积层 TCO_{acc} 和折射率不变的块体层 TCO, 前者厚度通常为 $1 \sim 3 \text{ nm}$, 光频介电常数 $\epsilon(y)$ 为坐标 y 的函数。当在 TCO 和表面掺杂硅之间给定栅压 V_g 时, 界面 HfO_2 -TCO 上电子累积, 会造成累积层材料的介电常数变化相对块体层逐渐下降。通过 Drude 模型, 并结合 (3) ~ (6) 式, 可以计算出不同偏压下, TCO- HfO_2 界面处介电常数的空间分布。为了便于比较 4 种 TCO 材

料对移相器的影响, 本文统一规定初始载流子浓度为 10^{19} cm^{-3} ^[18], 在该条件下, 4 种 TCO 均处于介电态, 介电实部接近其高频介电常数, 虚部值约为 10^{-2} , 基本属于无损状态; 而且这个状态 TCO 薄膜离满足金属态条件不远。以基于 CdO 材料的光波导器件为例, 在栅极电压下, 其介电常数的实部和虚部分别如图 2(c) 和图 2(d) 所示。随着电压的升高, CdO 截面累积层电子浓度升高, 介电常数的绝对值增大。在距离 TCO-Si 界面 $0 \sim 0.3 \text{ nm}$ 厚度范围内, CdO 的介电常数呈指数变化, 因此可实现有效的相位调制。

通过 COMSOL 建模仿真, 计算了不同栅极电压 V_g 作用下, 产生 2π 相移时, 光波导移相器的长度 $L_{2\pi}$ 和对应器件插入损耗 $i_{\text{loss}, 2\pi}$ 随外加电压的变化关系, 如图 3 所示。图 3(a) 和 (b) 为基于 (3)、(4)

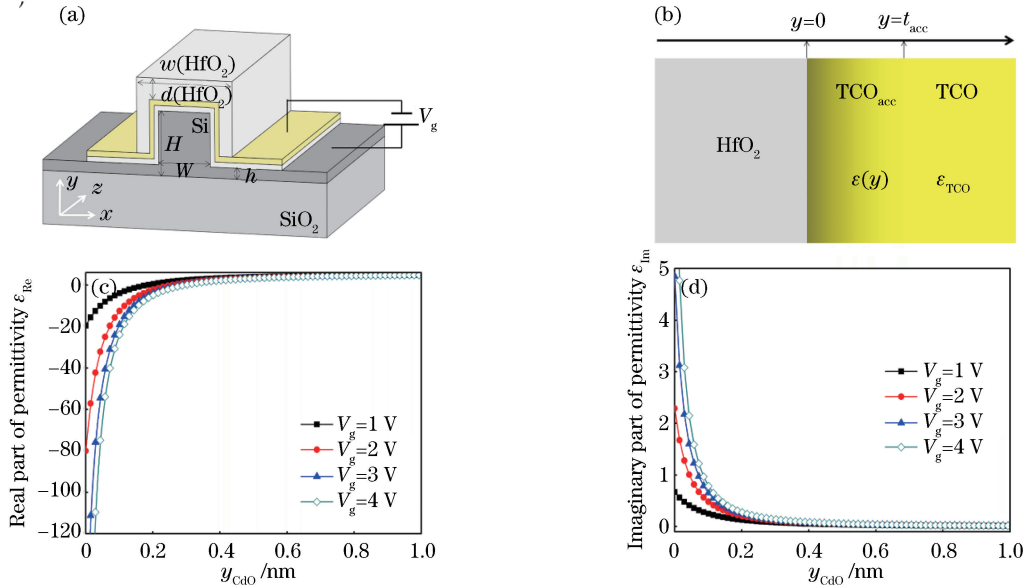


图 2 硅基光波导移相器。(a)基于 TCO 材料的硅基光波导移相器结构;(b) HfO_2/TCO 界面介电常数分布;

CdO 薄膜截面累积层在栅电压下的 (c) 介电常数实部和 (d) 介电常数虚部与坐标的关系

Fig. 2 Silicon-based optical waveguide phase shifter. (a) Structure of proposed TCO-based optical waveguide phase shifter; (b) permittivity distribution of HfO_2/TCO interface; (c) real and (d) imaginary parts of permittivity on gate voltage of cross-section cumulative layer of CdO film as functions of coordinate

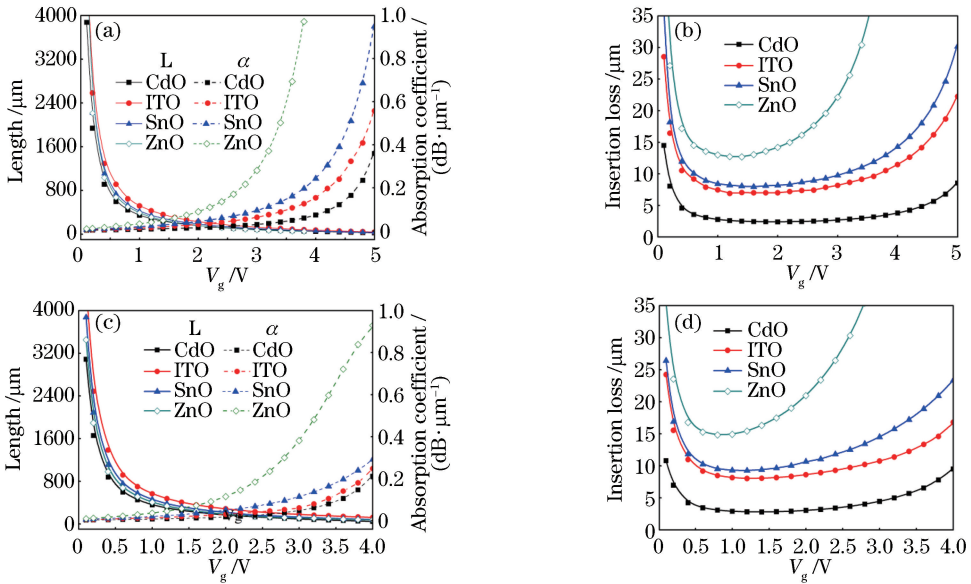


图3 实现 2π 移相时, TCO 移相器的器件长度 $L_{2\pi}$ 、吸收系数 α 和器件插入损耗 $i_{\text{loss}, 2\pi}$ 随外加电压的变化关系。(a)(b)单层模型; (c)(d)多层模型

Fig. 3 Device length $L_{2\pi}$, absorption coefficient α , and insertion loss $i_{\text{loss}, 2\pi}$ of proposed TCO-based phase shifter as functions of gate voltage for achieving 2π -phase shift. (a)(b) Single-layer model; (c)(d) multi-layer model

式得到的单层模型仿真结果,图4(c)和(d)是对基于(5)~(7)式得到的多层模型仿真结果。由图3(a)可知,栅电压 V_g 增大,产生 2π 相移的波导长度变短,单位长度的波导损耗增加,这是界面层折射率绝对值逐渐变大造成的。进一步分析器件插入损耗,由图3(b)和(d)可知,栅电压 V_g 不论过高还是过低都会导致较高的插入损耗,器件存在插入损耗最低的最优工作电压 $V_{g, \text{opt}}$,其范围为 $0.5 \sim 4$ V。器件插入损耗随电压的变化关系可以通过图3(a)和(c)解释,当施加高电压时,器件的有效折射率降低,产生 2π 相移的器件长度变小,但 TCO 材料的吸收系数急剧上升,造成器件插入损耗升高;相反,在较低的电压下,器件单位长度的吸收系数较低,但需要较长的器件长度来实现 2π 相移,故图3(c)和(d)的插入损耗曲线呈 U 型。进一步分析不同材料对器件移相和插入损耗的影响,基于 SnO 和 ITO 移相器的 $i_{\text{loss}, 2\pi}$ 变化最接近,这是因为 SnO 和 ITO 有类似的光学参数,而基于 SnO 的插入损耗略高于 ITO,这是因为其有效质量小于 ITO,阻尼系数略高;具有最低迁移率的 ZnO 的插入损耗远高于其他 3 种材料。由于 CdO 材料的高迁移率,基于 CdO 的移相器的插入损耗低于基于其他 TCO 材料的移相器,并且插入损耗最低点小于 3 dB。

进一步对比图3(a)和(b),以及图3(c)和(d)可知,器件长度和插入损耗与外加电压趋势类似。但

图3(b)和(d)存在 3 个明显差异:1) 多层模型获得的最低插入损耗略高于简化模型;2) 多层模型中图3(d)对应于最低插入损耗的外加电压低于图3(b);3) 多层模型中图4(d)中的插入损耗较低的电压范围比图3(b)窄。这是由于在多层模型中,TCO 界面介电常数随栅电压呈指数变化,越靠近界面,变化越大,界面介电常数等效平均得到的该结构的有效折射率比其实际分布得到的有效折射率偏大;即对累积层剖分越细,界面介电常数解析得到的结果越吻合 TCO 界面介电常数的实际分布,相同有效折射率对应的栅电压相应变小。

为说明基于不同 TCO 材料移相器的模式特征,本文研究了其光波导器件模式的电磁场分布。图4(a)、(b)分别为基于 CdO 移相器电场调控下横磁(TM)模场归一化的 $|E|^2$ 分布图。 $|E|^2$ 在不加电压的情况下[图4(a)]和在最优工作电压 $V_{g, \text{opt}} = 1.4$ V 下[图4(b)]的整体分布类似;而基于 CdO 的光波导移相器的差异在于 CdO 附近的电场分布,插图显示为累积层附近的 $|E|^2$ 。随着栅极电压的增加,TCO 的介电常数实部逐渐下降,电场在 TCO 界面层逐渐增强,整个结构的有效折射率逐渐下降,从而产生相移。图4(c)、(d)分别为基于 CdO 光波导移相器在最优工作电压时 TM 模式横向磁场 H_x 和纵向电场 E_y 的分布图;图4(e)、(f)分别为当 TCO 材料为 SnO 和 CdO 时,其电场 E_y 沿图4(c)

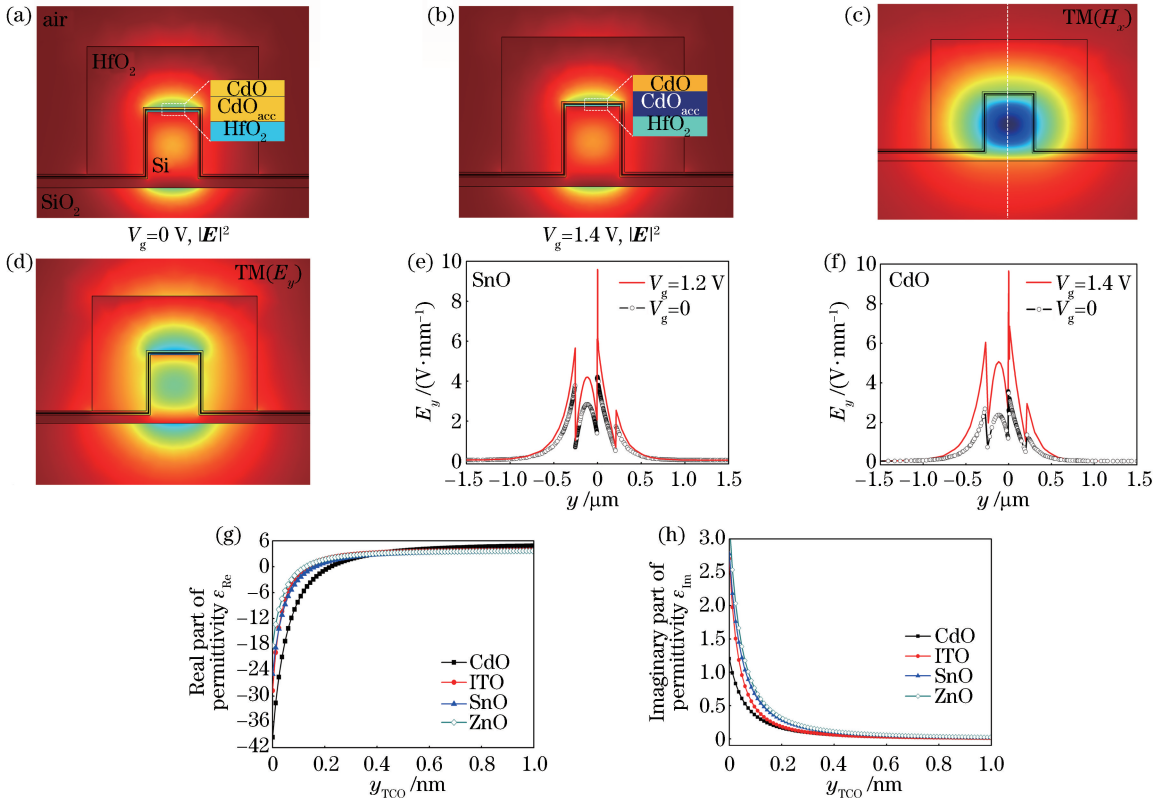


图4 基于TCO移相器的性能对比分析。基于CdO移相器的电场调控下 $|E|^2$ 的分布,(a) $V_g=0$ 和(b) $V_g=1.4$ V;在栅电压为1.4 V时TM模式的场分布,(c) H_x 和(d) E_y ;(e)基于SnO材料和(f)基于CdO材料的波导移相器电场分量在不同电压下沿着图4(c)中心白色虚线的分布;基于4种TCO材料的波导移相器在最优工作电压下,累积层TCO_{acc}的介电常数分布,(g)实部和(h)虚部

Fig. 4 Performance comparative analysis of TCO-based phase shifters. Distributions of $|E|^2$ of CdO-based phase shifter at gate voltages of (a) $V_g=0$ V and (b) $V_g=1.4$ V; distributions of (c) H_x and (d) E_y of TM mode at gate voltage of 1.4 V; distributions of electric-field component along central white dot line in Fig. 4(c) at different gate voltages for (e) SnO-based and (f) CdO-based waveguide phase shifters; (g) real and (h) imaginary parts of permittivity of accumulation layer TCO_{acc} of waveguide phase shifters based on four different materials at optimal gate voltages

中心纵向虚线的分布,而 $V_{g, \text{opt}}=1.2$ V 和 $V_{g, \text{opt}}=1.4$ V 分别对应基于 SnO 和 CdO 器件在产生单位移相时,使器件插入损耗最低的栅电压。尽管电场分量在该结构中的整体分布类似,但施加电压后基于 CdO 移相器的 E_y 的变化量高于基于 SnO 移相器。表明产生同样的相移,基于 SnO 的移相器需要的器件长度比基于 CdO 的移相器更长。比较了最优工作电压下,4 种 TCO 材料在 TCO/HfO₂ 界面处介电常数的实部和虚部随坐标 y 的变化,如图 4 (g)和(h)所示。其中,基于 CdO 移相器的界面介电常数实部变化高于其他 3 种材料,并且其介电常数虚部的数值始终保持最低。因此,基于 CdO 的移相器可实现最短的器件尺寸,同时拥有最低的插入损耗。可以发现,随着电压增加,基于 TCO 的移相器的介电常数实部从大到小的顺序为

CdO、SnO、ITO 和 ZnO,虚部从大到小的顺序为 ZnO、SnO、ITO 和 CdO。结合表 1 可知:实部下降的速度与静态介电常数的大小保持一致,静态介电常数越大,电子累积速度越快,故单位长度器件移相越大;而虚部数值与电子迁移率直接相关,高迁移率材料的吸收系数低,单位长度器件的传输损耗也越低。

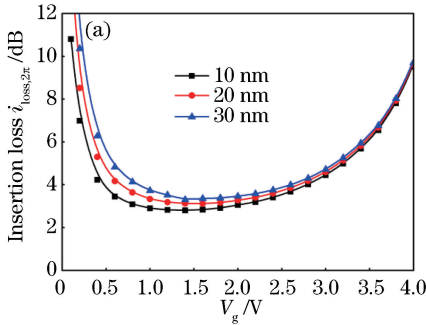
4 种 TCO 移相器在上述两种计算模型下的性能参数如表 2 所示,包括产生 2π 移相时,器件对应的栅电压、器件长度和调制效率 $V_\pi L$ 。其中, $V_\pi L$ 为实现 π 移相时器件工作电压和长度的乘积,数值越小表示器件性能越优。由表 2 可知,材料迁移率对器件插入损耗有显著影响。如基于迁移率为 $35 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 ZnO 材料的光波导移相器插入损耗为 CdO 的 6~7 倍,器件长度也是其 2 倍。

表 2 基于不同 TCO 材料的硅波导移相器在产生 2π 相移时的性能参数Table 2 Performance parameters of silicon-based waveguide phase shifters based on different TCO materials when generating 2π -phase shift

| TCO material | Single-layer model | | | | Multi-layer model | | | |
|--------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------|-------------------------------------|
| | $i_{\text{loss}, 2\pi}/\text{dB}$ | $V_{g, \text{opt}}/\text{V}$ | $L/\mu\text{m}$ | $V_{\pi}L/(\text{V}\cdot\text{cm})$ | $i_{\text{loss}, 2\pi}/\text{dB}$ | $V_{g, \text{opt}}/\text{V}$ | $L/\mu\text{m}$ | $V_{\pi}L/(\text{V}\cdot\text{cm})$ |
| CdO | 2.37 | 2.0 | 155 | 0.016 | 2.803 | 1.4 | 253 | 0.018 |
| ITO | 6.9 | 1.6 | 323 | 0.026 | 8.034 | 1.2 | 437 | 0.028 |
| SnO | 7.9 | 1.6 | 242 | 0.019 | 9.250 | 1.2 | 377 | 0.022 |
| ZnO | 12.6 | 1.4 | 254 | 0.018 | 14.80 | 0.8 | 511 | 0.020 |

ITO 移相器长度较基于 SnO 移相器长度偏大, 而 ITO 的插入损耗却略低于 SnO 的原因是 ITO 的吸收系数低于 SnO。 $V_{\pi}L$ 基本在 0.02 左右波动, 差异不大。 综上可知, 基于 CdO 移相器的性能最优。

基于上述仿真结果, 器件结构参数对移相器性能的影响如图 5 所示。 仿真了 TCO 薄膜厚度和 Si 波导高度、宽度不同时, 基于 CdO 移相器插入损耗的差异。 图 5(a) 为改变 CdO 薄膜厚度时, 器件插入损耗 $i_{\text{loss}, 2\pi}$ 随栅电压 V_g 的变化, 较厚的 CdO 层会给整个器件带来额外的损耗, 厚度每增加 10 nm, 整个器件会额外增加约 0.3 dB 的损耗。 这是因为



界面累积层的介电常数变化并不随 CdO 厚度变化, 为得到更低的插入损耗, TCO 应尽量薄。 图 5(b) 为器件插入损耗 $i_{\text{loss}, 2\pi}$ 随硅波导高度和宽度的变化关系。 随着硅波导宽度增加, 器件的插入损耗升高, 且硅波导越高, 插入损耗增加越快; 当硅波导宽度小于 150 nm 时, 器件最低插入损耗低于 2.7 dB, 但随着硅波导宽度继续减小, TM 模式出现截止。 硅波导越宽或越高, TM 模场逐渐局域在硅波导中, 模场与 CdO 的相互作用逐渐减弱, 限制因子下降, 从而造成器件长度变大, 器件插入损耗增加。 因此, 在保证 TM 模场不截止和加工条件允许的情况下, 硅波导的宽度和高度应尽量小。

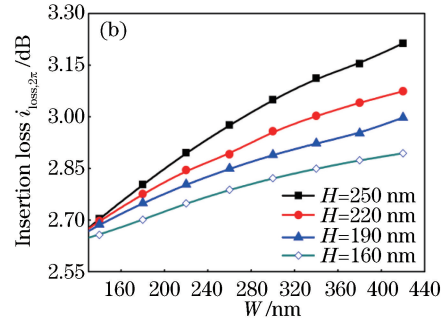


图 5 器件结构参数对移相器性能的影响。(a) CdO 厚度; (b) 硅波导的宽度和高度

Fig. 5 Influences of device structural parameters on phase shifter performance. (a) CdO thickness; (b) width and height of silicon-based waveguide

最后探讨了基于 TCO 材料的硅基光波导移相器的调制速度。 移相器调制速度的主要影响因素为器件的电阻器电容器(RC)响应时间 τ ^[33], 其中基于 TCO-HfO₂-Si 的 MOS 结构的电容为

$$C \approx C_{\text{acc}} = \Delta Q / \Delta V, \quad (8)$$

$$\frac{C}{A} = \Delta N \cdot t_{\text{acc}} \cdot e / \Delta V, \quad (9)$$

式中: C 为基于 TCO 移相器的电容, 其值近似等于 TCO 累积层的电容 C_{acc} ; A 为 TCO 移相器的 MOS 电容结构的横截面面积。 电压变化 ΔV 时, 累积层电子变化 ΔN , 总电荷改变量为 ΔQ 。

该结构的电阻为 TCO 薄膜和硅波导材料电阻

之和^[18], 即

$$R = R_{\text{Si}} + R_{\text{TCO}} = (\rho_{\text{Si}} t_{\text{Si}} + \rho_{\text{TCO}} t_{\text{TCO}}) / A, \quad (10)$$

$$\tau = RC = (\rho_{\text{Si}} H + \rho_{\text{TCO}} t_{\text{TCO}}) \cdot \frac{C}{A}, \quad (11)$$

式中: H 和 t_{TCO} 分别为 Si 和 TCO 薄膜的厚度; R_{Si} 和 R_{TCO} 分别为该 MOS 结构中的 Si 波导和 TCO 薄膜带来的电阻, 当掺杂的硅载流子浓度为 10^{18} cm^{-3} 时^[18], 硅的电阻率 $\rho_{\text{Si}} = 0.03 \Omega \cdot \text{cm}$; ρ_{TCO} 为 TCO 薄膜的电阻率。 以 CdO 为例, 当载流子浓度为 10^{19} cm^{-3} 时, 计算可得 CdO 的电阻率 $\rho_{\text{CdO}} = 0.002 \Omega \cdot \text{cm}$ 。 将 $C/A = 0.044 \text{ F} \cdot \text{m}^{-2}$ 代入(11)式得到 RC 响应时间 $\tau = 3 \text{ ps}$, 对应的调制速度可达

300 GHz。

对比基于自由载流子的色散效应(FCD)和热光效应(TO),电光移相器因调制速度仅受 RC 响应时间的影响,与 TO 的欧姆加热和 FCD 基于载流子扩散的机制^[33-35]不同。所以,TCO 移相器的调制速度高于其他 3 种移相器,其理论值均可达到 300 GHz。这与基于 TCO 材料的光吸收调制器的结论一致^[36]。与其他移相器相比,TCO 移相器的长度较短,电压较低,而损耗比 FCD 和 TCO 移相器略高,但其损耗问题可以通过制备更高迁移率的 TCO 材料来解决。因此,TCO 移相器在尺寸、调制带宽、功耗和 CMOS 兼容性上都具有一定优势。该器件结构基于硅光波导平台,通过投影曝光或电子束曝光制备硅波导结构,而实现调制部分的 MOS 电容结构可通过溅射沉积 TCO 薄膜和原子层沉积 HfO₂ 来实现。

4 结 论

提出了一种基于 TCO 材料的低损耗硅基光波导移相器件,并基于 Drude 模型、Thomas-Fermi 理论和有限元仿真,分析了基于不同 TCO 材料(ITO、CdO、SnO 和 ZnO)的光波导移相器性能参数与材料迁移率、有效质量和静态介电常数之间的关系。结果表明,TCO 材料的迁移率对移相器的插入损耗影响最大。数值仿真结果表明,具有高迁移率的 TCO 材料,如 CdO,适合应用于高速、低插入损耗硅基光波导移相器。基于 CdO 的高调制速度移相器拥有最佳的性能:当 π 移相时,其插入损耗为 1.4 dB,器件长度为 127 μm ,理论调制带宽可达 300 GHz。本研究证明了 TCO 材料迁移率对光波导移相器的重要影响,为发展基于 TCO 材料的高速、低插入损耗的硅基光波导移相器提供了新思路。

参 考 文 献

- [1] Soref R. The past, present, and future of silicon photonics[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(6): 1678-1687.
- [2] Liu A S, Jones R, Liao L, *et al.* A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor [J]. Nature, 2004, 427 (6975): 615-618.
- [3] Subbaraman H, Xu X C, Hosseini A, *et al.* Recent advances in silicon-based passive and active optical interconnects[J]. Optics Express, 2015, 23 (3): 2487-2511.
- [4] Zhuang D W, Han X C, Li Y X, *et al.* Silicon-based optoelectronic integrated optical phased array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55 (5): 050001.
庄东炜,韩晓川,李雨轩,等. 硅基光电子集成光控相控阵的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 050001.
- [5] Chmielak B, Waldow M, Matheisen C, *et al.* Pockels effect based fully integrated, strained silicon electro-optic modulator [J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17212-17219.
- [6] Liang F C, Li M, Wu D M. Optimized design of low driving and high modulation X-cut LiNbO₃ electro-optical modulator [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (7): 0713001.
梁凤超,李敏,吴东岷. 低驱动、高调制 X-Cut 铌酸锂电光调制器的优化设计[J]. 光学学报, 2018, 38 (7): 0713001.
- [7] Rao A, Patil A, Malinowski M, *et al.* Electro-optic and second-order nonlinear effects in thin film lithium niobate on silicon [C] // 2017 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM), July 10-12, 2017, San Juan, Puerto Rico. New York: IEEE, 2017: 151-152.
- [8] Green W M J, Rooks M J, Sekaric L, *et al.* Ultra-compact, low RF power, 10 Gb/s silicon Mach-Zehnder modulator [J]. Optics Express, 2007, 15 (25): 17106-17113.
- [9] Feng N N, Liao S R, Feng D Z, *et al.* High speed carrier-depletion modulators with 1.4 V-cm $V_{\pi}L$ integrated on 0.25 μm silicon-on-insulator waveguides [J]. Optics Express, 2010, 18(8): 7994-7999.
- [10] Soref R, Bennett B. Electrooptical effects in silicon [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23 (1): 123-129.
- [11] Yaacobi A, Sun J, Moresco M, *et al.* Integrated phased array for wide-angle beam steering [J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 4575-4578.
- [12] Coutts T J, Young D L, Li X N. Characterization of transparent conducting oxides [J]. MRS Bulletin, 2000, 25(8): 58-65.
- [13] Kim J, Naik G V, Emani N K, *et al.* Plasmonic resonances in nanostructured transparent conducting oxide films [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(3): 4601907.
- [14] Walsh A, da Silva J L F, Wei S H. Multi-component transparent conducting oxides: progress in materials modelling [J]. Journal of Physics: Condensed

- Matter, 2011, 23(33): 334210.
- [15] 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.
- [16] Yi F, Shim E, Zhu A Y, *et al.* Voltage tuning of plasmonic absorbers by indium tin oxide[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(22): 221102.
- [17] Baek J, You J B, Yu K. Free-carrier electro-refraction modulation based on a silicon slot waveguide with ITO[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15863-15876.
- [18] Sinatkas G, Ptilakis A, Zografopoulos D C, *et al.* Transparent conducting oxide electro-optic modulators on silicon platforms: a comprehensive study based on the drift-diffusion semiconductor model[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(2): 023109.
- [19] 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.
- [20] Cai X Y, Wang X W, Li R X, *et al.* Controllable modulation of surface plasmon resonance wavelength of ITO thin films [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 051602.
蔡昕畅, 王新伟, 李如雪, 等. ITO 薄膜表面等离子体共振波长的可控调节 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 051602.
- [21] Fardad S, Ramos E A, Salandrino A. Accumulation-layer surface plasmons in transparent conductive oxides [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10): 2038-2041.
- [22] Yan M, Lane M, Kannewurf C R, *et al.* Highly conductive epitaxial CdO thin films prepared by pulsed laser deposition[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(16): 2342-2344.
- [23] Koffyberg F P. Electron concentration and mobility in semimetallic CdO [J]. *Canadian Journal of Physics*, 1971, 49(4): 435-440.
- [24] van Daal H J. The static dielectric constant of SnO₂ [J]. *Journal of Applied Physics*, 1968, 39(9): 4467-4469.
- [25] Ellmer K, Mientus R. Carrier transport in polycrystalline transparent conductive oxides: a comparative study of zinc oxide and indium oxide[J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(14): 4620-4627.
- [26] Calnan S, Tiwari A N. High mobility transparent conducting oxides for thin film solar cells [J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518(7): 1839-1849.
- [27] Wood M G, Campione S, Serkland D K, *et al.* High-mobility transparent conducting oxides for compact epsilon-near-zero silicon integrated optical modulators [C] // *Frontiers in Optics 2017*, September 18-21, 2017, Washington, D.C., United States. Washington, D.C.: OSA, 2007: JW3A.46.
- [28] Sachet E, Shelton C T, Harris J S, *et al.* Dysprosium-doped cadmium oxide as a gateway material for mid-infrared plasmonics [J]. *Nature Materials*, 2015, 14(4): 414-420.
- [29] Exarhos G J, Zhou X D. Discovery-based design of transparent conducting oxide films [J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515(18): 7025-7052.
- [30] Koida T, Fujiwara H, Kondo M. Structural and electrical properties of hydrogen-doped In₂O₃ films fabricated by solid-phase crystallization [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, 354: 2805-2808.
- [31] Coutts T J, Young D L, Li X, *et al.* Search for improved transparent conducting oxides: a fundamental investigation of CdO, Cd₂SnO₄, and Zn₂SnO₄ [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2000, 18(6): 2646-2660.
- [32] Babicheva V E, Boltasseva A, Lavrinenko A V. Transparent conducting oxides for electro-optical plasmonic modulators [J]. *Nanophotonics*, 2015, 4(1): 165-185.
- [33] Wang J T, Zhou L J, Zhu H K, *et al.* Silicon high-speed binary phase-shift keying modulator with a single-drive push-pull high-speed traveling wave electrode [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(3): 58-62.
- [34] Han J H, Boeuf F, Fujikata J, *et al.* Efficient low-loss InGaAsP/Si hybrid MOS optical modulator [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(8): 486-490.
- [35] Harris N C, Ma Y J, Mower J, *et al.* Efficient, compact and low loss thermo-optic phase shifter in silicon [J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 10487-10493.
- [36] 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.