

中红外波段高速硅基电光调制器设计与优化 (特邀)

刘雨菲^{1,2}, 李欣雨^{1,2}, 王书晓¹, 岳文成¹, 蔡艳^{1*}, 余明斌³

- (1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050;
2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049;
3. 上海微技术工业研究院, 上海 201800)

摘要: 作为中红外波段中最接近 O 波段和 C 波段的波段, 2 μm 波段区域逐渐引起人们的广泛关注。主要对 2 μm 波段的马赫-增德尔型调制器进行优化设计和仿真, 根据 2 μm 波长下光模场分布的特点, 选用具有 340 nm 厚度顶层硅的 SOI 衬底, 结合实际工艺中 240 nm 硅刻蚀深度, 得到宽度为 600 nm 以及平板层厚度为 100 nm 的最优脊波导结构。通过优化掺杂浓度和掺杂区位置获得综合性能最优的调制器器件, 在 4 V 反向偏压下器件光损耗为 5.17 dB/cm, 调制效率为 2.86 V \cdot cm, 静态消光比为 23.8 dB, 3dB EO 带宽为 27.1 GHz。同时, 与 220 nm 厚度顶层硅器件相比较, 器件的综合性能更为优越。研究内容为后续器件实际制作提供了依据, 也为后续 2 μm 波段光收发集成模块所需调制器设计提供了新的方向。

关键词: 硅基光电子学; 中红外波段; 调制器

中图分类号: TN214 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220092

Design and optimization of high-speed silicon-based electro-optical modulator in mid-infrared band (*Invited*)

Liu Yufei^{1,2}, Li Xinyu^{1,2}, Wang Shuxiao¹, Yue Wencheng¹, Cai Yan^{1*}, Yu Mingbin³

- (1. State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Shanghai Industrial μ Technology Research Institute, Shanghai 201800, China)

Abstract: The 2 μm wavelength band, which is the closest to the O and C communication band in the mid-infrared band, has gradually attracted widespread attention. A Mach-Zehnder modulator in the wavelength of 2 μm was optimally designed and simulated. According to the distribution characteristics of the optical mode field in the wavelength of 2 μm , an SOI substrate with the top silicon thickness of 340 nm was selected. Combined with the process of the etching depth of 240 nm, the optimal rib waveguide width was 600 nm and the thickness of the slab layer was 100 nm. By optimizing the doping concentration and the positions of the doping regions, an optimal overall performance of the modulator was obtained. The modulator operated with the static extinction ratio of 23.8 dB, the optical loss of 5.34 dB/cm, the modulation efficiency of 2.86 V \cdot cm and the 3 dB EO bandwidth of 27.1 GHz at the reverse bias of 4 V. Besides, compared with the device with the top silicon thickness of 220 nm, the overall performance of the modulator was more superior. The research content provides a basis of the device

收稿日期: 2022-02-08; 修订日期: 2022-03-08

作者简介: 刘雨菲, 女, 博士生, 主要从事硅基光电子学、高速硅基电光调制器方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 蔡艳, 女, 研究员, 博士, 主要从事新型硅光子器件及硅光工艺平台集成方面的研究。

tape-out, and also provides a new idea for the design of the modulator required for the 2 μm band optical transceiver integrated module.

Key words: silicon photonics; mid-infrared band; modulators

0 引言

随着信息化时代的来临,数据容量急剧上涨,人们在不断探索新的用来缓解短距离光互连及数据中心应用场景压力的通信窗口。2 μm 波段由于具有低损耗、低延迟的空心光子带隙光纤以及超带宽、大增益的掺铥放大器 (TDFA) 等优势^[1-2],强势地进入了大众视野。鉴于传统的绝缘体上硅 (SOI)^[3-5] 在 2 μm 波长下透明的同时,平台工艺也兼容 CMOS, 2 μm 波段仍然是探寻新波段的第一选择。目前,该波段无源器件和探测器均有相关研究^[6-9],电光调制器作为光通信系统中的核心器件,也非常迫切地需要向 2 μm 波段转型。

目前,已经有部分研究小组对 2 μm 波段的纯硅基电光调制器展开了研究。最初,工作在 1.95 μm 波长的 220 nm 厚度顶层硅的马赫-曾德尔干涉型 (MZI) 调制器在 4 V 反向偏压下调制效率达到 2.68 V·cm,其速率达到 20 Gbit/s,消光比 5.8 dB;同时表征的微环调制器 (MRM) 速率为 3 Gbit/s,功耗为 2.38 pJ/bit^[10]。后续,南洋理工大学团队发表了利用交错 PN 结结构的 MZI 调制器,在 3 V 反向偏压下带宽为 9.7 GHz,速率为 12.5 Gb/s^[11];哈尔滨工业大学等团队共同发表了 50 Gbit/s 的高速率 MZI 调制器^[12]以及采用 T 型电极结构的 MZI 调制器,单臂调制效率为 1.6 V·cm,4 级脉冲幅度调制 (PAM4) 格式速率为 80 Gbit/s^[13];上海交通大学等团队共同发表了 L 型掺杂结构的微环调制器,调制效率小于 1 V·cm,速率为 45 Gbps,2 V 反向偏压下带宽为 15 GHz^[14]。但由于受到测试设备以及器件结构在 220 nm 顶层硅的 SOI 衬底的限制,器件在带宽和损耗方面还有待提升。

由于中红外波段光模场分布大于通信波段,选择更厚的顶层硅可以缓解光模场限制不佳的问题。在中红外波段,有很多器件使用了工艺线常用的具有 340 nm 顶层硅的 SOI 衬底的平台,如:光信噪比为 40 dB 的亚波长光栅槽型波导^[15];超低传输损耗为 1 dB/cm 的波导和插入损耗为 0.29 dB 的多模干涉型

光耦合器 (MMI)^[9];消光比 12.1 dB、Q 值 15 300 且 TE 基模预计灵敏度 337.5 nm/RIU 的微环生化传感器^[16]等,这也为调制器在中红外波段的优化提供了新的思路。

文中针对已有的 2 μm 波段硅基电光调制器,从光模场分布角度出发进行优化,选择了具有 340 nm 厚度顶层硅的 SOI 衬底,对器件的光学和电学性能进行整体的仿真分析和优化,希望可以为 2 μm 波段调制器在集成收发模块中综合性能的应用提供新的思路。

1 设计与仿真

硅材料由于其本身电光系数较弱,并非电光器件材料的第一选择^[17]。为了克服这一弱点,早在 20 世纪 80 年代 Richard Soref 和 Brian Bennett 就提出了基于硅材料在 O 波段和 C 波段的自由载流子的等离子色散效应^[18]。后由 Milos Nedeljkovic 在波段上对其拓展到 14 μm,得到 2 μm 波段自由载流子的等离子色散效应如下^[19]:

$$\Delta\alpha(2\ \mu\text{m}) = 3.22 \times 10^{-20} \times \Delta N_e^{1.149} + 6.21 \times 10^{-20} \times \Delta N_h^{1.119} \quad (1)$$

$$-\Delta n(2\ \mu\text{m}) = 1.91 \times 10^{-21} \times \Delta N_e^{0.992} + 2.28 \times 10^{-18} \times \Delta N_h^{0.841} \quad (2)$$

式中: α 为吸收系数, cm^{-1} ; n 为折射率的实部; ΔN_e 为由于电子浓度变化引起的折射率变化量; ΔN_h 为由于空穴浓度变化引起的折射率变化量。

与 C 波段自由载流子的等离子色散效应相比,硅材料在 2 μm 波段时,电子和空穴浓度发生变化会引起更大的折射率实部变化,这更有利于光在调制器的移相臂中发生相移。但同时吸收系数变化也更剧烈,会使得损耗增大且使得器件的消光比降低。因此,需要基于以上情况对 2 μm 波段的调制器进行针对性优化,让器件的综合性能获得进一步提升。

1.1 脊波导结构选择

如图 1 所示,由于 2 μm 波长下光模场分布显著大于 O 波段和 C 波段,这使得调制器的高掺杂区域和金属接触通孔区域需要放置在距脊波导更远距离

的位置, 此时器件的射频性能将会降低。因此, 选择具有 340 nm 厚度顶层硅的 SOI 衬底, 在与现有工艺线提供的多项目晶圆 (MPW) 工艺兼容的同时尽可能地将光模场限制在脊波导内部, 使得光模场与耗尽层有更好的重叠, 从而降低损耗, 提升器件性能。

根据工艺线提供的 240 nm 硅刻蚀工艺^[20], 选择平板层厚度 (H_{slab}) 为 100 nm 的脊波导结构, 并根据单模传输条件选择合适的脊波导宽度 (W_{rib})。分别仿真了 1.55 μm 波长和 2 μm 波长的光模场分布情况, 其

中芯层材料为硅 ($n_{\text{eff}}=2.62$), 包层材料为二氧化硅 ($n_{\text{eff}}=1.27$), 如图 1 所示。可以得出, 当波长为 2 μm 时, 光模场在 340 nm 脊波导厚度中限制的更好。同时, 仿真了顶层硅厚度为 340 nm、平板层厚度为 100 nm 的脊波导在 TE_0 和 TE_1 模式下有效折射率和光损耗随脊波导宽度的变化情况, 结果如图 2 所示。随着波导宽度的增加, 有效折射率持续增大, 损耗持续减少, 但超过单模截止条件时就会引入高阶模式。因此, 最终选择宽度为 600 nm 的脊波导。

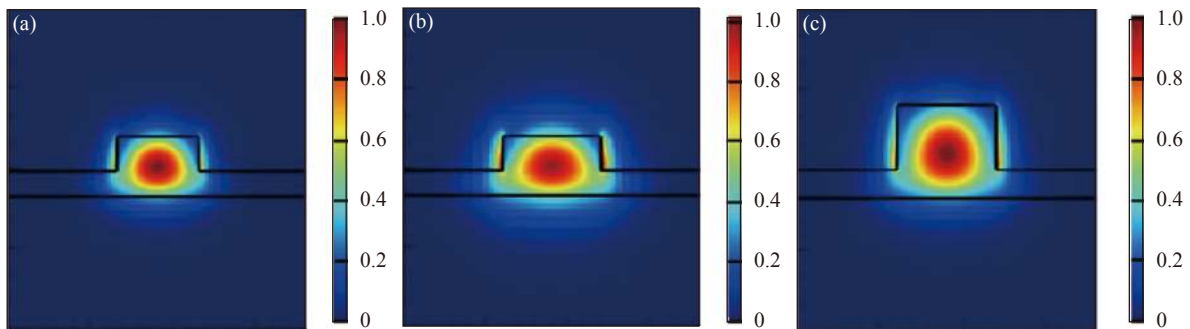


图 1 (a) 1.55 μm 波长下 220 nm 顶层硅 ($W_{\text{rib}}=500 \text{ nm}$, $H_{\text{slab}}=90 \text{ nm}$); (b) 2 μm 220 nm 顶层硅 ($W_{\text{rib}}=600 \text{ nm}$, $H_{\text{slab}}=90 \text{ nm}$); (c) 2 μm 340 nm 顶层硅 ($W_{\text{rib}}=600 \text{ nm}$, $H_{\text{slab}}=100 \text{ nm}$) 光模场分布图

Fig.1 Optical mode field distribution of (a) 220 nm top silicon modulator in the wavelength of 1.55 μm ($W_{\text{rib}}=500 \text{ nm}$, $H_{\text{slab}}=90 \text{ nm}$); (b) 220 nm top silicon modulator in the wavelength of 2 μm ($W_{\text{rib}}=600 \text{ nm}$, $H_{\text{slab}}=90 \text{ nm}$); (c) 340 nm top silicon modulator in the wavelength of 2 μm ($W_{\text{rib}}=600 \text{ nm}$, $H_{\text{slab}}=100 \text{ nm}$)

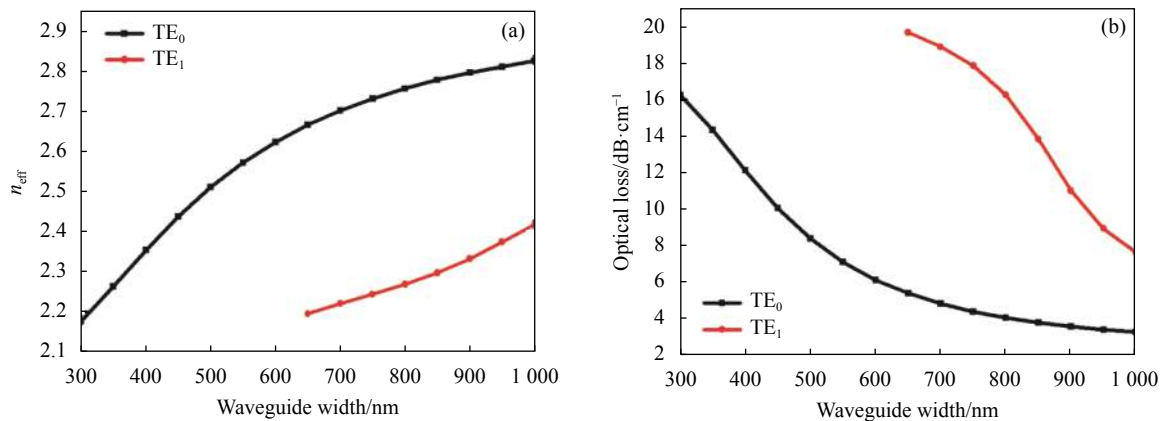


图 2 脊波导 ($H_{\text{rib}}=340 \text{ nm}$, $H_{\text{slab}}=100 \text{ nm}$) 在 TE_0 和 TE_1 模式下 (a) 有效折射率及 (b) 光损耗随脊波导宽度变化情况

Fig.2 Variation of (a) effective refractive index and (b) optical loss with the waveguide width ($H_{\text{rib}}=340 \text{ nm}$, $H_{\text{slab}}=100 \text{ nm}$) for TE_0 and TE_1 modes

1.2 调制器结构及 PN 结仿真与优化

图 3 为 MZI 型调制器的结构示意图, 其中埋氧层厚度为 2 μm , 有源区采用脊波导结构, 使用横向 PN 结嵌入到每个臂中, W_{rib} 和 H_{rib} 分别为脊波导宽度和厚度, H_{slab} 为平板层厚度, S_{dop} 和 W_{dop} 分别为中掺杂区和重掺杂区距脊波导边缘的距离, offset 定义为掺杂

偏移量 (由脊波导中心向 N 区方向偏移的距离)。调制器整体由两个 3.5 mm 长的有源波导和信号电极构成。掺杂结构和浓度基于参考文献 [13] 已有的脊波导厚度为 220 nm 的调制器结构进行优化, offset 为 25 nm, P 区初始掺杂浓度为 $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, N 区初始掺杂浓度为 $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 选择 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的浓度作为中

间掺杂区的浓度,中间掺杂区的引入有利于进一步降低 PN 结串联电阻,同时保持较低的光损耗。重掺杂部分的 P++和 N++区域浓度为 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$,更有利于形成欧姆接触。

由公式 (1)、(2) 可知,空穴的等离子子色散效应更强,因此在结区位置的选择上更倾向于 P 型掺杂区域更宽。仿真了在 2 V 和 4 V 反向偏压下,调制器的光损耗和调制效率随掺杂偏移量的变化情况,如图 4 所示。从图 4 结果可以看出,在不同偏压下,调制效率随偏移量变化不大,光损耗在偏移量为 20 nm 时有最小值。

之后仿真了不同掺杂浓度对器件性能的影响,如图 5 所示。在 PN 区掺杂浓度比值不变的情况下,随

着掺杂浓度的升高,光损耗逐渐升高,而调制效率值的下降趋势逐渐减缓。需要在两个性能中寻找折中值,最终选定的 P 区掺杂浓度为 $6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$,N 区掺杂浓度为 $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。

接下来对中掺区和重掺区的位置进行了仿真优化,如图 6(a)~(b) 所示,随着中掺区距结区位置变远,光损耗降低的趋势逐渐变缓,而调制效率变化幅度不大。因此,选择了距结区距离为 0.6 μm 的中掺区位置,并对重掺区位置进行优化。如图 6(c)~(d) 所示,光损耗先降低后升高,而调制效率变化幅度不大,故认为在重掺区距结区位置为 0.7 μm 时调制器的性能最佳,此时 4 V 反向偏压下,光损耗为 5.17 dB/cm,调制效率为 2.86 V·cm。

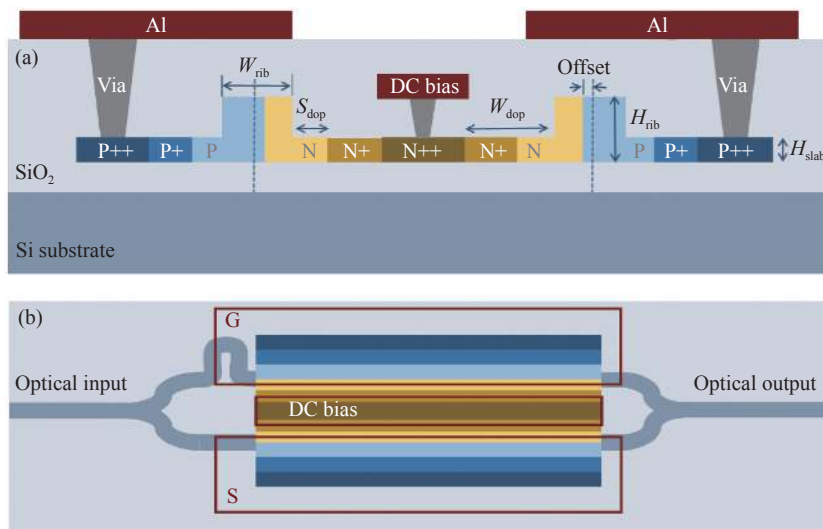


图 3 调制器 (a) 横截面及 (b) 俯视图结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of (a) cross section of the modulator and (b) top view of the modulator

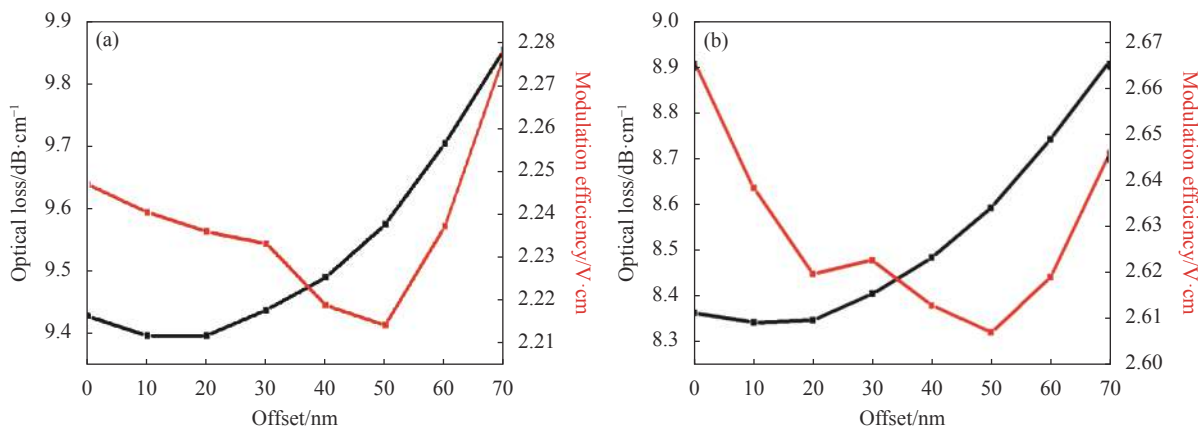


图 4 (a) -2 V 及 (b) -4 V 偏压下,调制器光损耗和调制效率随 PN 结偏移量变化情况

Fig.4 Under (a) -2 V and (b) -4 V bias, the optical loss and modulation efficiency of the modulator as a function of the PN junction offset

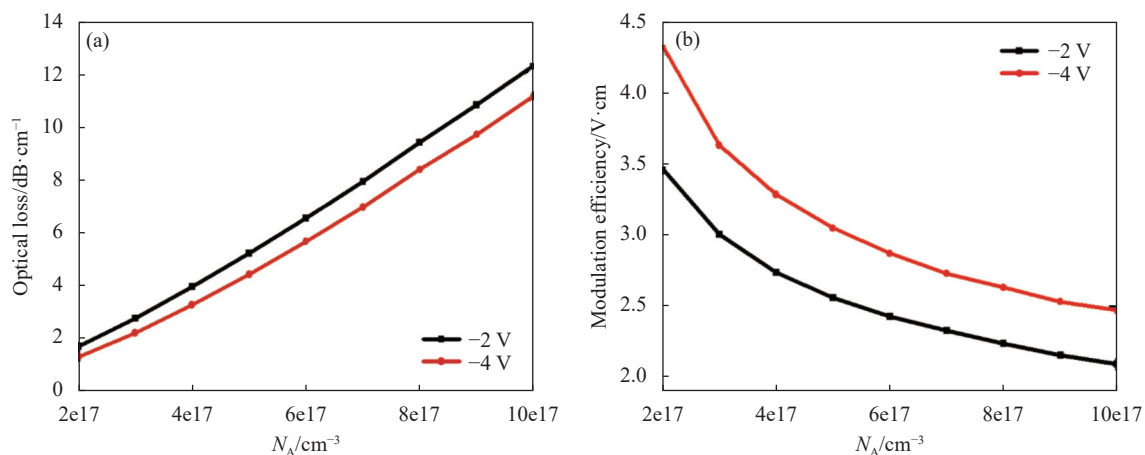


图 5 -2 V 和 -4 V 偏压下, (a) 光损耗及 (b) 调制效率随掺杂浓度变化情况

Fig.5 (a) Optical loss and (b) modulation efficiency as a function of doping concentration under -2 V and -4 V bias

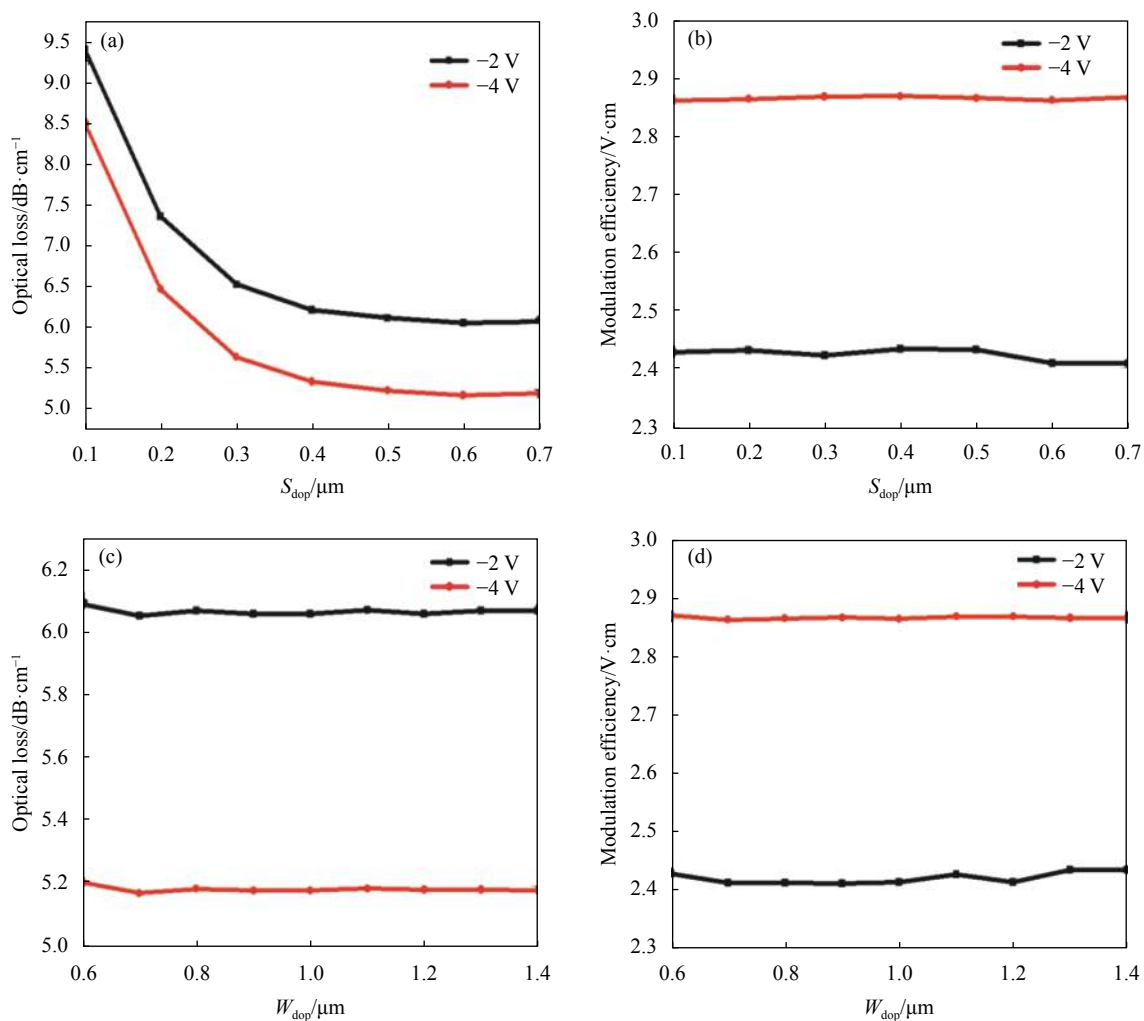


图 6 (a) 光损耗及 (b) 调制效率随中掺区位置; (c) 光损耗及 (d) 调制效率随重掺区位置变化情况

Fig.6 (a) Optical loss and (b) modulation efficiency as a function of the position of the middle-doping region; (c) Optical loss and (d) modulation efficiency as a function of the position of the heavy-doping region

1.3 调制器性能表征

基于上述掺杂浓度及位置对调制器的各项性能进行了仿真。图 7 为器件在最优掺杂浓度及位置下的自由载流子分布情况。仿真了器件在单臂加压情况下光传输随波长变化的情况及调制器在不同偏压下的相移情况,如图 8 所示。在 4 V 反向偏压下,静态消光比为 23.8 dB。

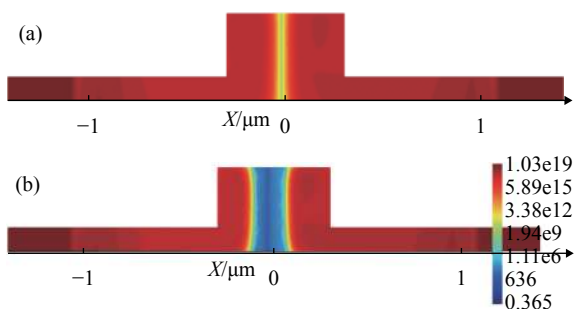


图 7 (a) 0 V 及 (b) -4 V 偏压下自由载流子分布情况

Fig.7 Distribution of free carriers under (a) 0 V and (b) -4 V bias

行波电极部分选择共面微带线 (GS) 结构,采用 PN 结串联形成的单端推挽结构,更有利于降低电容的同时促进阻抗的匹配,但同时它的驱动电压几乎是双端驱动的 2 倍。综合考虑微波损耗、速度匹配与阻抗匹配对带宽的影响,电极间距离选择 20 μm ,电极宽度为 50 μm ,顶层铝金属层厚度参考工艺线厚度为 2 μm ,终端电阻匹配为 50 Ω 。电极性能结果如图 9 所示,在 2 μm 波长处选择器件的工作点,在 4 V 反向偏

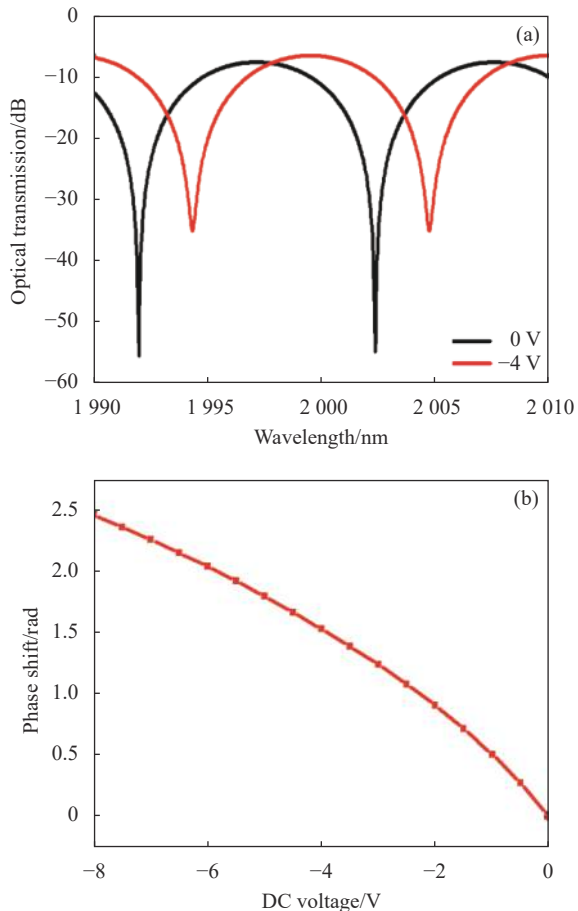


图 8 (a) 0 V 和 -4 V 偏压下光传输情况; (b) 不同偏压下相移情况

Fig.8 (a) Optical transmission under 0 V and -4 V bias; (b) Phase shift under different bias

压下,调制器的电学带宽(即下降 6.4 dB 带宽)约为 28.3 GHz,EO 带宽(即下降 3 dB 带宽)拟合后约为 27.1 GHz。

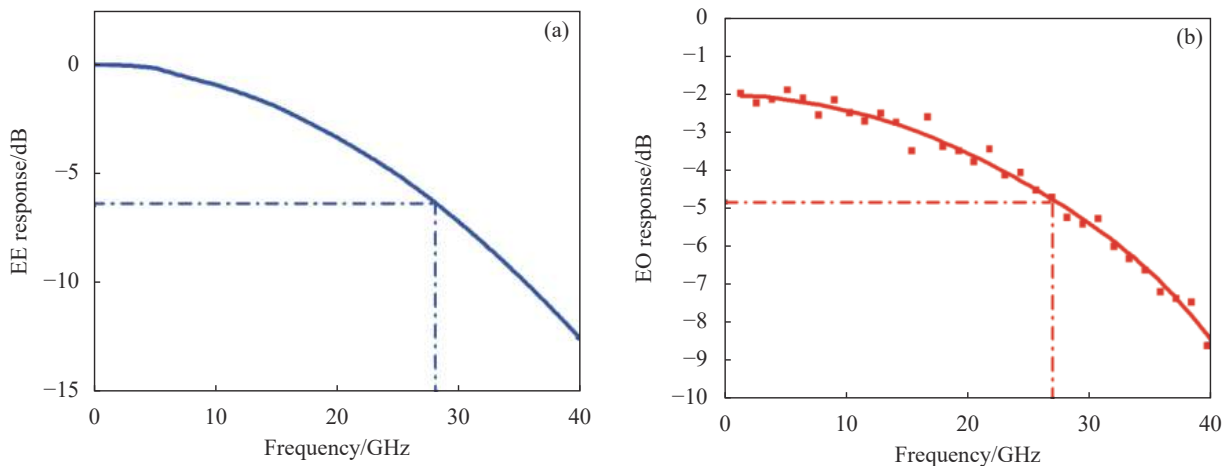


图 9 (a) 调制器电学带宽及 (b) 电光带宽

Fig.9 (a) Electrical bandwidth and (b) electro-optical bandwidth of the modulator

将 2 μm 波段下脊波导厚度为 340 nm 的调制器的性能与脊波导厚度为 220 nm 的调制器性能相比较,如表 1 所示。仿真结果对比中,脊波导厚度为 220 nm 的调制器 ($W_{rib}=600\text{ nm}$, $H_{slab}=90\text{ nm}$) 掺杂位置和浓度与参考器件一致,电极结构与脊波导厚度为 340 nm 的调制器结构相同。从仿真结果看,脊波导厚度为 340 nm 的调制器较脊波导厚度为 220 nm 的器件光损耗更低,调制效率更优,器件综合性能得到了优化。同时,与参考文献报道的脊波导厚度为 220 nm

的调制器进行对比。第三组^[13]为采用 T 型电极单端推挽结构的调制器,在 2 V 反向偏压下带宽为 18 GHz,在 8 V 反向偏压下,长度为 2 mm 的调制器实现 π 相移。第四组^[11]为交错 PN 结结构的调制器,器件在长度为 1.5 mm 时插入损耗为 3.2 dB,在 3 V 反向偏压下带宽为 9.7 GHz。后续工作也会在脊波导厚度为 340 nm 的调制器结构中进行进一步的结构优化,以期器件的综合性能可以得到进一步提升。

表 1 2 μm 波段调制器性能对比

Tab.1 Comparisons of the modulator performance under the 2 μm wavelength band

Modulators	Loss	Modulation efficiency	Drive	Bandwidth
1 This work (Simulation)	5.17 dB/cm @4 V(optical loss)	2.86 V·cm @4 V	GS single-push pull	27.1 GHz @4 V
2 220 nm MZM (Simulation)	7.07 dB/cm @4 V(Optical loss)	3.17 V·cm @4 V	GS single-push pull	27.9 GHz @4 V
3 220 nm MZM (Measurement) ^[13]	10 dB @2 mm length(Insertion loss)	1.6 V·cm @8 V	T-shaped GS single-push pull	18 GHz @2 V
4 220 nm Interleaved PN Junction MZM (measurement) ^[11]	3.2 dB @1.5 mm length (Insertion loss)	-	GSG single	9.7 GHz @3 V

2 结 论

文中对 2 μm 波段的高速硅基电光调制器进行了优化,从 2 μm 波长下光模场分布出发,选用具有 340 nm 厚度顶层硅的 SOI 衬底,在增强脊波导对光模场限制的同时增加光模场与耗尽区的重叠范围。依托工艺线可提供的 240 nm 硅刻蚀深度得到宽度为 600 nm 的最优脊波导,并对掺杂位置进行优化,分析得到光损耗、调制效率和带宽均优异的调制器设计。优化后的调制器在 4 V 反向偏压下光损耗为 5.17 dB/cm,调制效率为 2.86 V·cm,静态消光比为 23.8 dB,带宽为 27.1 GHz。并与脊波导厚度为 220 nm 的调制器相比较,解决了新波段模场分布增大造成的器件性能受影响的问题,通过对比发现,脊波导厚度为 340 nm 的调制器综合性能更完备,仿真结果也为器件实际制作提供了依据,并为 2 μm 波段调制器的优化提供了新的方向,同时也为 2 μm 波段实际应用到光通信系统中奠定了基础。

参考文献:

[1] Shen W H, Du J B, Sun L, et al. Low-latency and high-speed

hollow core fiber optical interconnection at 2-micron waveband [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(15): 3874-3882.

[2] Li Z, Heidt A M, Simakov N, et al. Diode-pumped wideband thulium-doped fiber amplifiers for optical communications in the 1800-2050 nm window [J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26450-26455.

[3] Wang C, Wu J L, Chen G Y. Manufacture of low-g micro inertial switch utilizing SOI with double buried layers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(5): 1076-1083. (in Chinese)

[4] Gao F, Qin L, Chen Y Y, et al. Reseach progress of bent waveguide and its applications [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(2): 176-193. (in Chinese)

[5] Chen D Y, Cao M W, Wang J B, et al. Fabrication and wafer-level vacuum packaging of MEMS resonant pressure sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(5): 1235-1242. (in Chinese)

[6] Hu S Q, Tian R J, Gan X T. Two-dimensional material photodetector for hybrid silicon photonics [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1039-1055. (in Chinese)

[7] Li X L, Peng L Z, Liu Z, et al. 30 GHz GeSn photodetector on SOI substrate for 2 μm wavelength application [J]. *Photonics*

- Research*, 2021, 9(4): 494-500.
- [8] Lin H T, Sun B S, Ma H, et al. Review of mid-infrared on-chip integrated photonics (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20211111. (in Chinese)
- [9] Rouifed M S, Littlejohns C G, Tina G X, et al. Low loss SOI waveguides and MMIs at the MIR wavelength of 2 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(24): 2827-2829.
- [10] Cao W, Hangan D, Thomson D J, et al. High-speed silicon modulators for the 2 μm wavelength band [J]. *Optica*, 2018, 5(9): 1055-1062.
- [11] Wang W J, Zhang Z C, Guo X, et al. Mid-infrared (MIR) Mach-Zehnder silicon modulator at 2 μm wavelength based on interleaved PN junction [C]//CLEO: Science and Innovations, 2018: STh1B-1.
- [12] Li W X, Li M F, Zhang H G, et al. 50 Gbit/s silicon modulator operated at 1950 nm [C]//Optical Fiber Communication Conference, 2020: M1D-4.
- [13] Wang X, Shen W, Li W, et al. High-speed silicon photonic Mach-Zehnder modulator at 2 μm [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(4): 535-540.
- [14] Shen W, Zhou G, Du J, et al. High-speed silicon microring modulator at 2- μm waveband[J]. *arXiv*, 2021: 2104.01163.
- [15] Ruan Z, Shen L, Zheng S, et al. Subwavelength grating slot (SWGS) waveguide at 2 μm for chip-scale data transmission [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(5): 865-871.
- [16] Zhang Z, Ng G I, Hu T, et al. Mid-infrared sensor based on a suspended microracetrack resonator with lateral subwavelength-grating metamaterial cladding [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(2): 1-8.
- [17] Sun S H, Cai X L. High-performance thin-film electro-optical modulator based on heterogeneous silicon and lithium niobate platform (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20211047. (in Chinese)
- [18] Soref R, Bennett B. Electrooptical effects in silicon [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, 23(1): 123-129.
- [19] Nedeljkovic M, Soref R, Mashanovich G Z. Free-carrier electrorefraction and electroabsorption modulation predictions for silicon over the 1-14 μm infrared wavelength range [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(6): 1171-1180.
- [20] CORNERSTONE. CORNERSTONE STANDARD COMPONENTS LIBRARY (On SOI Platforms)[DB/OL]. [2022-03-08]. https://europactice-ic.com/wp-content/uploads/2020/07/CORNERSTONE-Standard-Components-Library_SOI.pdf.