

doi: 10.3788/gzxb20164505.0523001

# 硅-有机物材料混合电光调制器的优化设计

李凯丽, 安俊明, 张家顺, 王玥, 王亮亮, 吴远大, 李建光, 尹小杰, 王红杰

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083)

**摘 要:**设计了一种基于绝缘上层硅的硅-有机物材料混合马赫-曾德干涉型高速电光调制器. 利用光束传播法对顶层硅为 220 nm 的绝缘上层硅基片上的 3 dB 分束器/合束器的结构参数进行模拟, 优化后附加损耗仅为 0.106 dB. 为提高模式转换效率, 在条形波导和 slot 波导之间设计了模式转换器, 光耦合效率高达 98.8%, 实现了光模式高效转化. 利用时域有限差分法模拟了 slot 波导平板区掺杂浓度对波导内光学损耗的影响, 在几乎不产生光学损耗的情况下, 得到平板区轻掺杂浓度为  $710^{17}/\text{cm}^3$ , 调制器设计总损耗为 0.493 dB. 利用薄膜模式匹配法对 slot 波导结构进行仿真分析, 考虑 slot 区等效电容及平板区等效电阻对带宽的影响, 优化后得到 slot 波导结构的限制因子为 0.199. 采用 slot 波导与强非线性有机材料 LXM1 结合的绝缘上层硅平台实现了强普克尔效应, 得到电光调制器半波电压长度积为  $1.544 \text{ V} \cdot \text{mm}$ , 电学响应 3 dB 带宽为 137 GHz.

**关键词:**硅-有机物材料混合; 槽式波导; 电光调制器; 马赫曾德干涉; 模式转换器

中图分类号: TN761.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)05-0523001-7

## Optimal Design of High-speed SOH Electro-optic Modulator Based on SOI

LI Kai-li, AN Jun-ming, ZHANG Jia-shun, WANG Yue, WANG Liang-liang, WU Yuan-da,  
LI Jian-guang, YIN Xiao-jie, WANG Hong-jie

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A push-pull high-speed silicon-organic hybrid Mach-Zahnder interference electro-optic modulator was designed based on silicon on insulator. By using beam propagation method, the structure of 3 dB beam splitter/beam combiner on the silicon on insulator (top silicon thickness is 220 nm) has been simulated optimally whose insertion loss is 0.106 dB. Mode converter was designed between stripe waveguide and slot waveguide to realize an efficient transformation of optical transmission mode, and the coupling efficiency is as high as 98.8%. Also, the influence of doping concentration of slot waveguide slab area on optical loss of slot waveguide was analyzed by using finite-difference time domain method when the doping concentration is  $7 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ , the optical loss is nearly zero. The total loss of the modulator is 0.493 dB. Considering the effect of slot waveguide equivalent capacitance and slab area equivalent resistance on the bandwidths, the waveguide structure was simulated by film mode matching solver and the optical field confinement factor can be optimized to 0.199. The ultrafast pockels effect was exploited by using the silicon-organic hybrid platform, which combines highly nonlinear organic materials with slot waveguides, and realizes a voltage-length of  $1.544 \text{ V} \cdot \text{mm}$  and a bandwidth of 137 GHz.

**Key words:** Silicon-organic hybrid; Slot waveguide; Electro-optic modulator; Mach-Zahnder interference; Mode converter

**OCIS Codes:** 230.2090; 230.3120; 130.5460; 130.2790

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目 (No. 61274047)、国家自然科学基金重点项目 (No. 61435013) 和国家自然科学基金青年基金 (Nos. 61307034, 61205044) 资助

**第一作者:**李凯丽 (1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为硅基电光调制器. Email: likaili@semi.ac.cn

**导师 (通讯作者):**安俊明 (1969-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为硅基光波导器件及其集成. Email: junming@semi.ac.cn

**收稿日期:** 2015-12-11; **录用日期:** 2016-01-20

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

传输高速率、大容量数据需求促进了光网络的巨大发展,并且吸引了许多研究人员对电光调制器研究的兴趣<sup>[1-3]</sup>.电光调制器将电信号转变为光信号,同时能够实现电光信号转换、射频信号控制、光路控制等多种功能,因而在光纤通信网络中具有重要作用<sup>[4-6]</sup>.

基于硅材料制成的器件能够满足大规模集成光路对器件结构紧凑、性能优越、工艺技术成熟、成本低廉等要求,硅基微纳光子学被认为是未来光电信息处理系统的核心动力,为高度集成的光电器件提供了平台.近年来,各种硅基有源、无源光波导器件,如光衰减器<sup>[7-8]</sup>、光开关<sup>[9-10]</sup>、波分复用器<sup>[11-14]</sup>、滤波器<sup>[15-16]</sup>等发展迅速.

硅材料具有较大折射率,能够将大部分光集中限制在波导芯层,由于硅是对称结构,其二阶非线性效应很小,几乎可以忽略,因此硅没有电光效应.硅基电光调制器主要采用等离子色散效应来实现光的调制.但是载流子的注入和移除过程限制了光调制器的速度.另外,硅的三阶非线性效应,导致光的强度降低,或者必须采用PN结结构将载流子移除.在基于载流子色散效应的硅基电光调制器中,载流子耗尽机制最常用,

但是由于其本征吸收损耗较大,很难制成半波电压在1V以下具有实用价值的马赫曾德干涉型(Mach-Zahnder Interference, MZI)电光调制器,限制了硅基电光调制器调制速度和半波电压.采用基于绝缘层上硅(Silicon on Insulator, SOI)的硅-有机材料混合(Silicon-Organic Hybrid, SOH)电光调制器<sup>[17-19]</sup>可解决此问题. SOH 集成平台<sup>[20-22]</sup>结合了绝缘上层硅波导和有机非线性电光材料的优势,可将横电场模式限制在 slot 波导<sup>[23-24]</sup>内,与填充在槽型波导区的非线性有机材料相互作用实现电光调制,目前,基于 SOI 的 SOH 电光调制器的带宽最高可超过 100 GHz<sup>[25]</sup>,在能耗为 120 fJ/bit 时,数据传输速率可达 160 Gbit/s<sup>[26]</sup>.

本文设计了一种基于 SOI 的 SOH 马赫-曾德干涉型电光调制器,采用 slot 波导与强非线性有机材料 LXM1 结合的 SOH 平台实现强普克尔效应,从而获得半波电压长度积为  $1.544 \text{ V} \cdot \text{mm}$ ,电学响应带宽为 137 GHz 的电光调制器结构.

## 1 SOH 电光调制器的结构

SOH 马赫-曾德电光调制器的基本结构如图1(a),其包括两个相位调制器,以共面波导传输线在推挽模式下工作.每个相位调制器由填充非线性有机聚

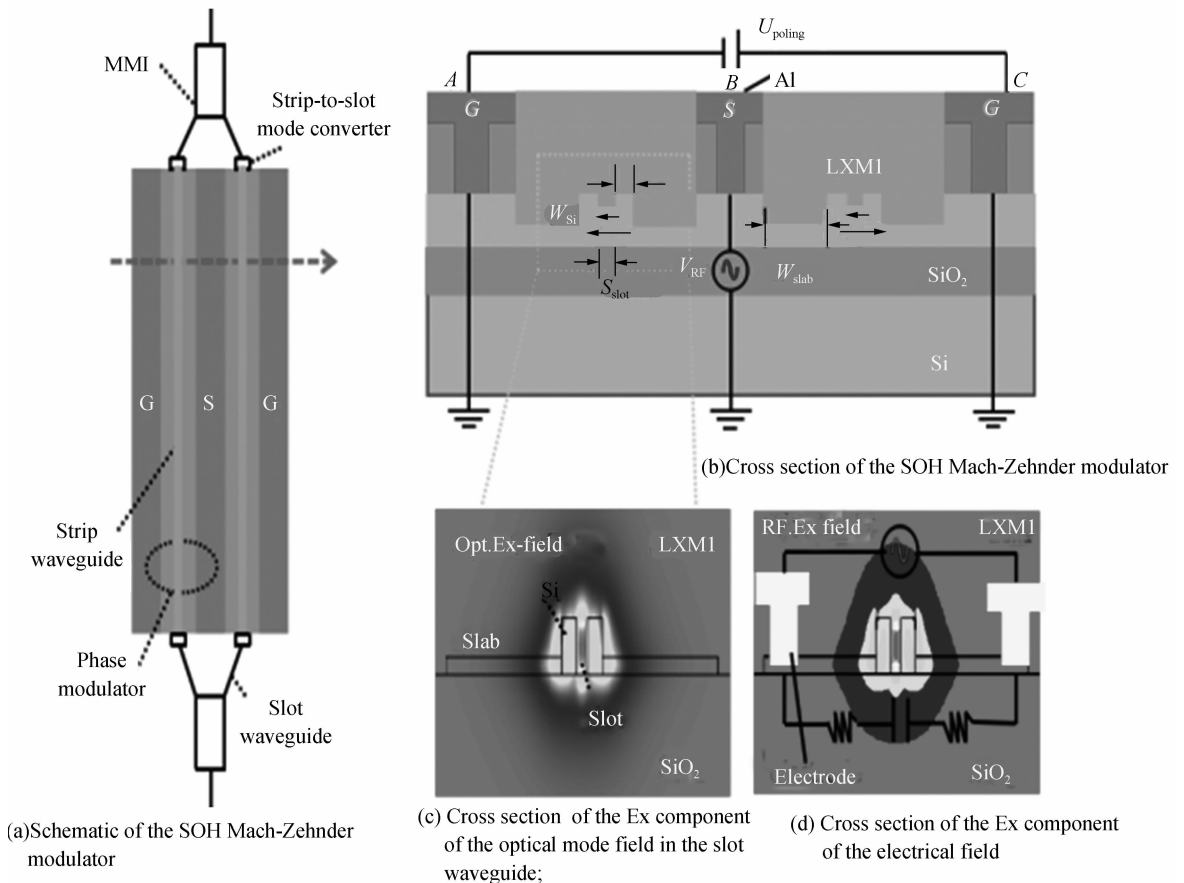


图1 硅-有机物材料混合马赫-曾德干涉调制器

Fig. 1 Silicon-organic hybrid(SOH) Mach-Zehnder modulator

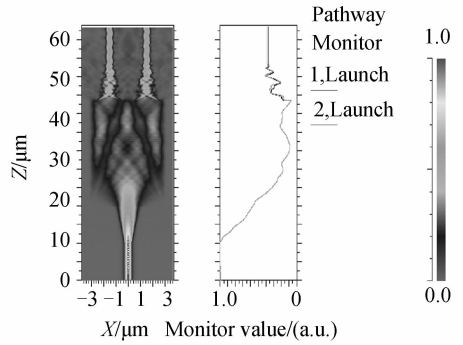
合物材料(LXM1)的 slot 波导组成,其结构如图1(b). 硅的高折射率(硅折射率为 3.478)和非线性聚合物材料的低折射率(LXM1 折射率为 1.67)使光的准 TE 模式很好的限制在 slot 波导内,如图 1(c). 当在调制器上施加电压,slot 波导内形成强电场,如图 1(d). 因此调制电场和光场模式之间有很大的交叠,获得了高调制电压. 为实现高速调制,设计的行波电极由铝材料制作,由于硅材料的高阻抗微波信号不能远距离传输,同时,行波电极直接接触波导会造成光学损耗,因此对 slot 波导的平板区进行轻掺杂,产生导电性,从而导通 slot 波导和金属电极. 行波电极用来驱动电光调制器,不仅能够连接微波信号,而且可以连接极化电压,在极化状态下,接触点 A 和 C 分别位于极化电压的端点,C 点电压为  $U_{\text{poling}}$ , B 点电压为  $U_{\text{poling}}/2$ , C 点电压为 0. 从而使两个相位调制臂产生相同的极化效果,如图 1(b) 中实线箭头,当接触点 B 加射频信号时,A 点和 C 点同时接地,电压为 0,使两调制臂电场方向相反,如图 1 (b)中虚线箭头,调制器在推挽状态下工作.

## 2 无源光波导结构的设计

无源波导结构部分的设计主要包括 3 dB 分束器/合束器和 strip-to-slot 模式转化器两部分.

### 2.1 3 dB 光分束器/合束器的仿真设计

3 dB 分束器采用  $1 \times 2/2 \times 1$  MMI 结构,其结构示意图如图 2(a). 分束器/合束器由输入/输出波导、锥形过渡区波导和多模区波导组成. 输入/输出波导为符合单模条件的矩形波导,波导宽度为 500 nm,多模区存在多个波导模式,这些模式在多模区传输时发生干涉并形成稳定的干涉条纹. 锥形波导的过渡结构则有利于实现模式的平稳转换,利用光束传播法(Beam Propagation Method, BPM)模拟顶层硅厚度为 220 nm 的 3 dB 分束器能量分布及等高,模拟结果如图 2(b),由图 2(b)可知,3 dB 分束器可以将一束光均分为两



(b) The curves of additional loss of 3dB beam splitter

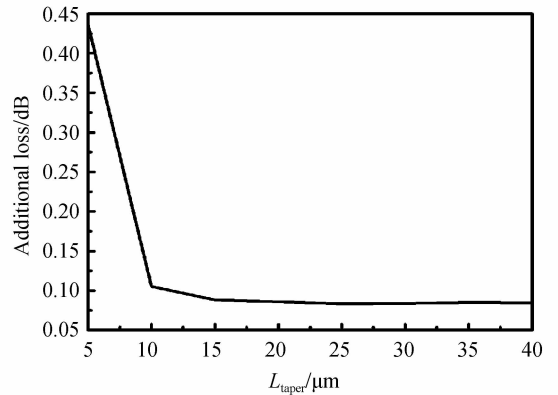
图 2 3 dB 分束器的仿真设计

Fig. 2 BPM simulation of 3 dB beam splitter

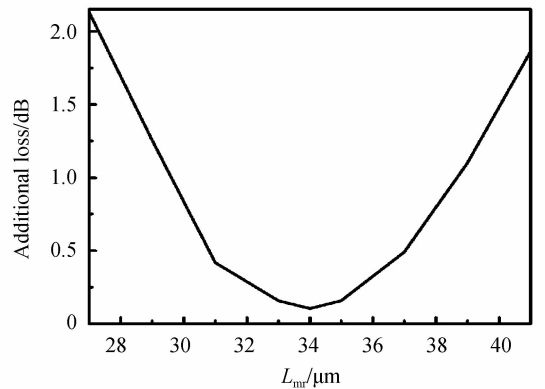
束,几乎没有损失.

为了减小光分束器/合束器的附加损耗,利用光束传播法对顶层硅为 220 nm 的 SOI 基片上的 3 dB 分束器/合束器的锥形过渡区长度  $L_{\text{taper}}$ 、宽度  $W_{\text{taper}}$  以及多模区的长度  $L_m$  进行模拟,模拟结果见图 3.

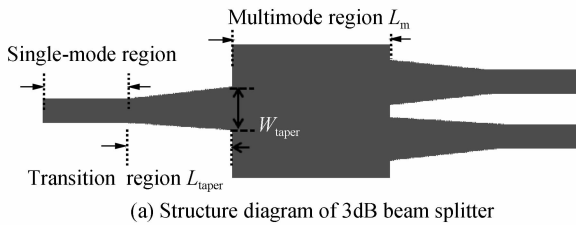
由图 3(a)可知,随  $L_{\text{taper}}$  增大,损耗减小,这是因为随过渡区长度增加,模式过渡越为平缓,当  $L_{\text{taper}}$  大于 15  $\mu\text{m}$  之后,附加损耗几乎不再变化,此时,模式实现了较好过渡. 由图3(b)可知,随  $L_m$  的增大,附加损耗先减小后增大,这是因为随多模区长度的增加,输出波导的位置不断变化,当输出波导的位置恰好位于多模区



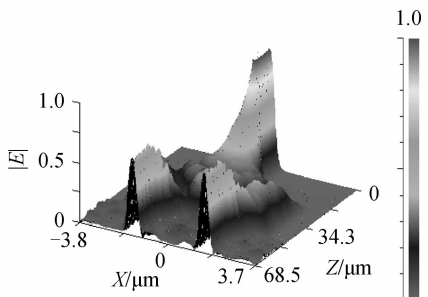
(a) The curves of additional loss changing with the length of transition region of 3dB beam splitter

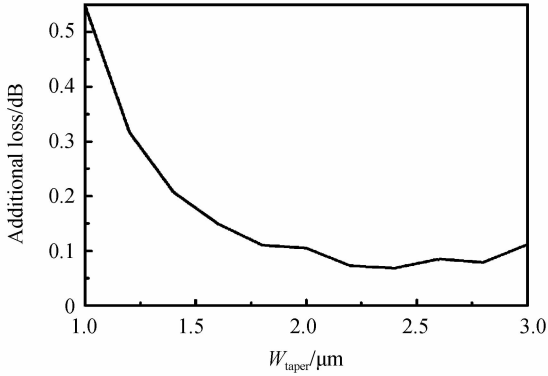


(b) The curves of additional loss changing with the length of multimode region of 3dB beam splitter



(a) Structure diagram of 3dB beam splitter





(c) The curves of additional loss changing with the width of transition region of 3dB beam splitter

图 3 3 dB 分束器的附加损耗变化曲线

Fig. 3 The curves of additional loss of 3 dB beam splitter 只出现两个干涉条纹时,附加损耗最小,此时  $L_m$  为 34 m,随着  $L_m$  继续增大,输出波导的位置从两个干涉条纹又变成一个干涉条纹,附加损耗开始增大.由图 3(c)可知,当  $W_{taper}$  大于 2 m 后,附加损耗变化缓慢,综合考虑器件的实际尺寸及模拟结果,最后选定多模区长度  $L_m$  为 34 m,过渡区长度  $L_{taper}$  为 25 m,过渡区宽度  $W_{taper}$  为 2.4 m,此时的附加损耗为 0.106 dB.

### 2.2 模式转换器的仿真设计

SOH 电光调制器包括条形波导和 slot 波导,为了提高两种模式之间的耦合效率,本文设计了基于对称的 MMI 结构的 strip-to-slot 模式转换器,其结构示意图如图 4.

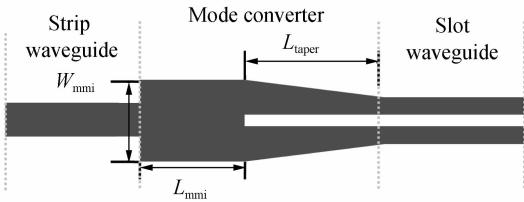
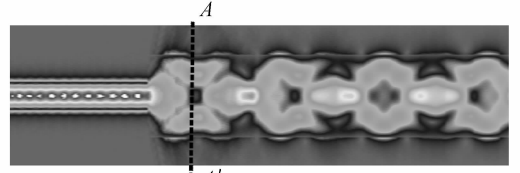


图 4 条形波导到槽式波导模式转换器结构

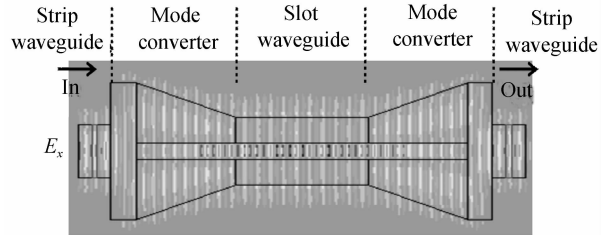
Fig. 4 Structure of strip-to-slot mode converter

整个模式转换器在顶层硅为 220 nm 的 SOI 平台上制作,条形波导和槽式纳米线波导宽度分别为 500 nm 和 120 nm,模式转换器由对称的 12MMI 和锥形过渡区域组成,MMI 的长度和宽度分别为  $L_{mmi}$ 、 $W_{mmi}$ ,其中  $W_{mmi}$  为 1.3,过渡长度为  $L_{taper}$ ,根据自映像效应<sup>[27]</sup>,输入场将会沿着光场传播方向的固定位置上周期性地生成单重或多重像.为减小模式转换器的长度,当选择合适的 MMI 长度时就会产生二重像.采用 BPM 对 MMI 结构的光场分布进行模拟,如图 5(a),第一个二重像所在位置 A-A' 处即为 MMI 的总长度,由此得到  $L_{mmi}$  为 1.5.为了使 strip 波导和 slot 波导更好耦合,在 strip 波导和 slot 波导之间设计了锥形过渡区,因为二重像之间几乎没有光场分布,所以过渡区的 slot 不会带来太多的光学损耗,当锥形过渡区的宽度

过渡到 slot 波导两侧宽度时,光波很好地耦合进 slot 波导内.采用时域有限差分法(Finite-Difference Time Domain, FDTD)法在中心波长 1 550 nm 的准 TE 模式下,对整个光场模式的演化过程进行仿真模拟,结果如图 5(b),模式转换器将 strip 波导的光模式几乎没有损耗的转化成 slot 波导内光模式.



(a) BPM simulation diagram of optical field distribution of the MMI structure



(b) BPM simulation diagram of optical mode distribution of different positions

图 5 模式转换器仿真设计

Fig. 5 The simulation design of mode converter 光在传输过程中的耦合效率为

$$C = (P_{out} / P_{in}) \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $P_{in}$  为光的输入光功率,  $P_{out}$  为光的输出光功率;图 6 为耦合效率锥形过渡区长度的变化.由图 6 可知,随过渡区长度的增大,耦合效率迅速增大,这是由于过渡区长度增加使两种模式之间实现了更加高效平顺转化.当  $L_{taper}$  为 2 时,耦合效率高达 98.8%,随着  $L_{taper}$  继续增大,耦合效率几乎不变.综合考虑模拟结果和工艺条件,选择  $L_{taper}$  为 3.

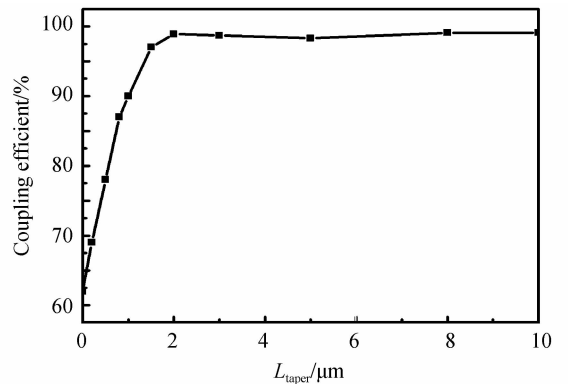


图 6 耦合效率随过渡区长度的变化曲线

Fig. 6 Curves of coupling efficiency changing with the length of taper transition

### 3 SOH 相位调制器的仿真设计

SOH 电光调制器其中一臂的相位调制器结构如

图7,该器件建立在顶层硅为220 nm、二氧化硅层为2 μm的SOI基片上,slot区宽度为 $W_{\text{slot}}$ ,硅基宽度为 $W_{\text{si}}$ ,硅基厚度为 $H_{\text{si}}$ ,平板区厚度为 $H_{\text{slab}}$ ,平板区宽度为 $W_{\text{slab}}$ .

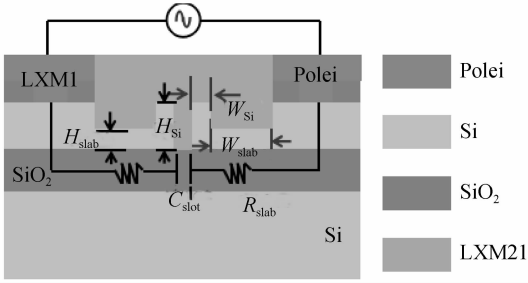
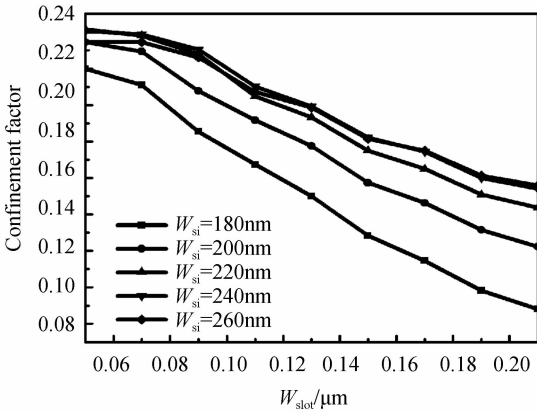
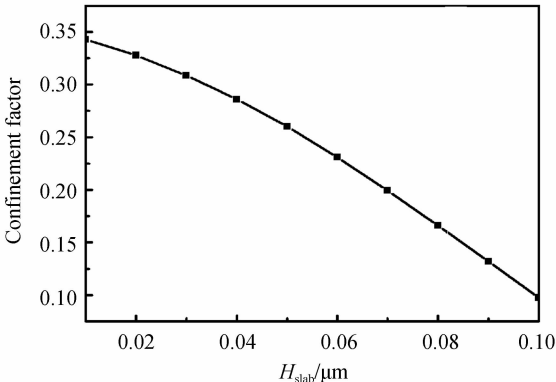


图7 SOH相位调制器结构及其等效电路图  
Fig. 7 Equivalent circuit diagram and structure of SOH phase modulator

为了增强slot波导区域的光场,增强与调制电场的相互作用,实现高的调制效率,在slot区域填充LXM1材料、在中心波长为1550 nm的条件下利用薄膜模式匹配法(Film Mode Matching, FMM)分别对slot波导的slot宽度 $W_{\text{slot}}$ 、硅基宽度 $W_{\text{si}}$ 进行仿真模拟.模拟结果如图8(a),由图8可知,随着 $W_{\text{slot}}$ 的增大,光学限制因子减小,对相同的 $W_{\text{slot}}$ ,当硅基宽度 $W_{\text{si}}$ 为240 nm时,光学限制因子最大.



(a) Curves of optical confinement factor changing with the width of slot waveguide



(b) Curves of optical confinement factor changing with the height of slab region

图8 光学限制因子变化曲线

Fig. 8 The curves of optical confinement factor

在slot宽度 $W_{\text{slot}}$ 为130 nm、硅基宽度 $W_{\text{si}}$ 为240 nm时,用FMM模拟slot波导内光学限制因子随平板区厚度 $H_{\text{slab}}$ 的变化情况如图8(b),由图可知,随着平板区厚度 $H_{\text{slab}}$ 的增大,光学限制因子减小.

slot区等效电容为 $C_{\text{slot}}$ ,硅平板区等效电阻为 $R_{\text{slab}}$ ,则其电学响应对3dB带宽的限制为

$$f_{\text{RC}} = \frac{1}{4\pi R_{\text{slab}} C_{\text{slot}}} \quad (2)$$

可见,减小slot区等效电容 $C_{\text{slot}}$ 或硅平板区等效电阻 $R_{\text{slab}}$ 能够增大带宽.为减小硅平板区等效电阻 $R_{\text{slab}}$ ,对平板区进行离子掺杂.但是掺杂浓度过高会引起slot区域内光的吸收,因此采取分段掺杂的方法,对硅平板区进行轻掺杂.为模拟掺杂浓度对slot区域内光学损耗造成的影响,用FDTD在不同掺杂浓度的情况下,对slot区域内光学损耗进行模拟,模拟情况如图9,随掺杂浓度的增加,光学损耗逐渐增大,当掺杂浓度低于 $7 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 时,光学损耗比较小,低于3%,当掺杂浓度高于 $7 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 时,光学损耗迅速增大.因此为了不产生明显光学损耗,同时增加带宽,选择轻掺杂浓度为 $7 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ ,掺杂区宽度 $W_{\text{doping}}$ 为 $2W_{\text{slab}}$ .为与电极接触部分形成好的欧姆接触,对电极下方进行重掺杂,掺杂浓度为 $11 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ .

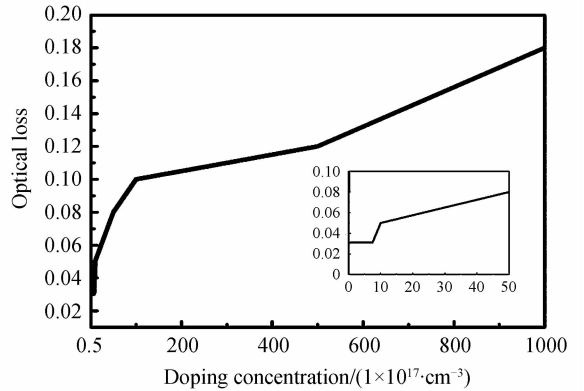


图9 slot光波导内光学损耗随掺杂浓度变化

Fig. 9 Curves of optical loss in slot waveguide changing with doping concentration

Slot区等效电容为平板电容,单位长度的等效电容为

$$C_{\text{slot}} = \frac{\epsilon S}{4\pi k d} = \frac{\epsilon H_{\text{si}}}{4\pi \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \omega_{\text{slot}}} = \frac{\epsilon n_0^2 H_{\text{si}}}{\omega_{\text{slot}}} \quad (3)$$

又知,平板区的单位等效电阻为

$$R_{\text{slab}} = \frac{\rho W_{\text{doping}}}{H_{\text{slab}}} = \frac{\rho W_{\text{doping}}}{H_{\text{slab}}} \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(2)得

$$f_{\text{RC}} = \frac{W_{\text{slot}} H_{\text{slab}}}{4\pi\epsilon_0 n_0^2 H_{\text{si}} \rho W_{\text{doping}}} \quad (5)$$

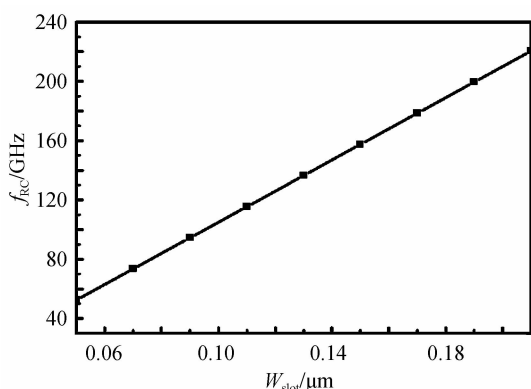
根据式(5),分别作带宽 $f_{\text{RC}}$ 随slot波导宽度 $W_{\text{slot}}$ 、平板区厚度 $H_{\text{slab}}$ 变化曲线,如图10,由图10(a)可知,

$f_{RC}$  随 slot 波导宽度  $W_{slot}$  增加而增大,考虑带宽,slot 波导宽度  $W_{slot}$  应该取大一些,又由图 8(a)可知,slot 波导宽度  $W_{slot}$  增加会导致光限制因子减小,因此  $W_{slot}$  又不宜取太大,同时还要考虑聚合物材料 LXM1 的填充情况,综合考虑,取  $W_{slot}$  为 130 nm,此时的光学限制因子为 0.199.

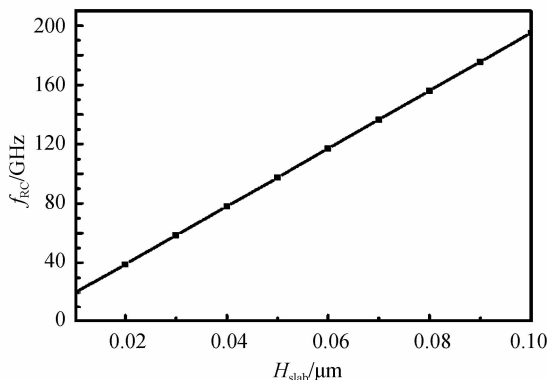
电光调制器的半波电压长度积为

$$V_{\pi} L = \frac{\lambda_0 \tau \omega_{slot}}{2n_0^3 r_{33} \tau} \quad (6)$$

式中  $\lambda_0$  为 1 550 nm,  $r_{33}$  为聚合物材料 LXM1 的电光系数,大小为 70 pm/V,  $n_0$  为 LXM1 的折射率,大小为 1.67,  $\tau$  为光学限制因子,  $L$  为调制臂长度,考虑调制效率,取为 2 mm. 将数据带入式(6),计算得半波电压长度积为 1.544 V · mm.



(a) Curves of 3dB bandwidth changing with the width of slot



(b) Curves of 3dB bandwidth changing with the height of slab

图 10 3 dB 带宽的变化曲线

Fig. 10 The curves of 3 dB bandwidth

图 10(b) 为 3 dB 带宽随平板区厚度  $H_{slab}$  的变化情况. 随平板区厚度  $H_{slab}$  的增大,带宽增大,但  $H_{slab}$  增大后,由图 8(b)可知,光学限制因子会减小,综合考虑,取  $H_{slab}$  为 70 nm.

综上所述,slot 波导结构参数分别取  $W_{slot}$  为 130 nm、 $H_{slab}$  为 70 nm、 $W_{si}$  为 240 nm 时,光学限制因子为 0.199,光波导有效折射率为 2.138,群折射率为 3.032,对应的半波电压长度积为 1.544 V · mm,得到电学响应 3 dB 带宽为 137 GHz.

## 4 结论

本文设计了一种基于 SOI 的 SOH 电光调制器,分别对 3 dB 分束器/合束器、模式转换器、slot 波导结构参数及硅基平板区掺杂浓度进行模拟仿真,通过填充强非线性有机材料 LXM1,得到电光调制器半波电压长度积为 1.544 V · mm,电学响应 3 dB 带宽为 137 GHz,为进一步开展 SOH 电光调制器的实验研究奠定了基础.

### 参考文献

- [1] CHEN H, CHEN B, HUANG D, *et al.* Broadband electro-optic polymer modulators with high electro-optic activity and low poling induced optical loss[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(1): 043507.
- [2] DONG P, LIAO S, FENG D, *et al.* Low Vpp, ultralow-energy, compact, high-speed silicon electro-optic modulator [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(25): 22484-22490.
- [3] LIU Jia-lei, XU Guang-ming, LIU Feng-guang, *et al.* Recent advances in polymer electro-optic modulators [J]. *RSC Advances*, 2015, **5**(21): 15784-15794.
- [4] GREEN W M, 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.
- [5] SUN Xiao-qiang, CHEN Chang-ming, LI Xiao-dong, *et al.* Polymer electro-optic modulator linear bias using the thermo-optic effect [J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, **29**(1): 014212.
- [6] LAUERMANN M, PALMER R, KOEBER S, *et al.* Low-power silicon-organic hybrid (SOH) modulators for advanced modulation formats [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(24): 29927.
- [7] YUAN Pei, WU Yuan-da, WANG Yue, *et al.* Monolithic integration of a 16-channel VMUX on SOI platform [J]. *Journal of Semiconductors*, 2015, **36**(8): 084005.
- [8] DAI Hong-qing, AN Jun-ming, WANG Yue, *et al.* Monolithic integration of a silica-based 16-channel VMUX/VDMUX on quartz substrate [J]. *Journal of Semiconductors*, 2014, **35**(10): 104010.
- [9] LI Ran, WANG Lei, CHEN Xi, *et al.* Design of an integrated device of delay line array and thermal optical switch based on polymeric materials [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **43**(4): 0423002.  
李然,王雷,陈曦,等.一种基于聚合物材料的延迟线阵列与热光开关集成器件的设计[J].光子学报,2013,43(4): 0423002.
- [10] ZHANG Zhong-yi, WU Bao-jian, WEN Feng, *et al.* Research on polarization dependent loss of micro ring resonator based optical switches [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(7): 0713002.  
张中一,武保剑,文峰,等.微环光开关的偏振相关损耗研究 [J].光子学报,2015,44(7):0713002.
- [11] QIN Zheng-kun, YU Yue, SONG Jia, *et al.* Analysis of fabrication results for 17 × 17 polymer arrayed waveguide grating multiplexers with flat spectral responses [J]. *Journal of Semiconductors*, 2013, **34**(9): 094011.
- [12] ZHAO Lei, AN Jun-ming, ZHANG Jia-shun, *et al.* 16 channel 200 GHz arrayed waveguide grating based on Si nanowire waveguides [J]. *Journal of Semiconductors*, 2011,

- 32(2): 024010.  
 赵雷,安俊明,张家顺,等. 基于硅纳米线波导的16通道200 GHz阵列波导光栅[J]. 半导体学报, 2011, 32(2):024010.
- [13] ZHANG Jia-shun, AN Jun-ming, ZHAO Lei, *et al.* Ultra compact triplexing filters based on SOI nanowire AWGs[J]. *Journal of Semiconductors*, 2011, 32(4): 044009.
- [14] FOLKER H, WILLIAM M G, SOLOMON A A, *et al.* Cascaded Mach-Zehnder wavelength filters in silicon photonics for low loss and flat pass-band WDM (de-) multiplexin [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 1652-11658.
- [15] ZHU Zhi-xiong, ZENG Xiang-Kai, LIU Quan-shun, *et al.* Characteristic analysis of single and double micro ring resonant cavity used in Mach-Zehnder interferometer filter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(7): 0713003.  
 朱志雄, 曾祥楷, 刘全顺, 等. 单环和双环微环谐振腔应用于马赫-曾德尔干涉仪滤波器的特性分析[J]. 光子学报, 2015, 44(7):0713003.
- [16] NAJAM M A, WANG Zhi-gong, LI Zhi-qun. An I/Q mixer with an integrated differential quadrature all-pass filter for on-chip quadrature LO signal generation [J]. *Journal of Semiconductors*, 2015, 36(5): 055001.
- [17] LAUERMAN M, PALMER R, KOEBER S, *et al.* Low-power silicon-organic hybrid (SOH) modulators for advanced modulation formats[J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29927-29936.
- [18] PALMER R, ALLOATTI L, KOM D, *et al.* Silicon-organic hybrid MZI modulator generating OOK, BPSK and 8-ASK signals for Up to 84 Gbit/s[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(2): 6600907.
- [19] ZHANG X, YUAN J, WANG K, *et al.* Strong modulation instability in a silicon-organic hybrid slot waveguide [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(4): 1-8.
- [20] KOOS C, LEUTHOLD J, FREUDE W, *et al.* Silicon-Organic Hybrid(SOH) and Plasmonic-Organic Hybrid(POH) integration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015: 1.
- [21] LEUTHOLD J, KOOS C, FREUDE W, *et al.* Silicon-organic hybrid electro-optical devices [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(6): 114-126.
- [22] LEUTHOLD J, FREUDE W, BROSI, *et al.* Silicon organic hybrid technology—a platform for practical nonlinear optics [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(7): 1304-1306.
- [23] LIU Yan, XU Xue-jun, CHEN Shao-wu, *et al.* Modelling and analysis of modal behaviour in SOI slot waveguides[J]. *Chinese physics letters*, 2008, 25(8): 2918-2921.
- [24] ZHENG Zheng, MUDDASSIR I, LIU Jian-sheng, *et al.* Dispersion characteristics of SOI-based slot optical waveguides [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(20): 5151-5155.
- [25] ALLOATTI L, PALMER R, DIEBOLD S, *et al.* 100 GHz silicon-organic hybrid modulator [J]. *Light-science and Applications*, 2014, 3(5): 173.
- [26] MATTHIAS L, STEFAN W, PHILIPP C S, *et al.* 40GBd 16QAM signaling at 160 Gb/s in a silicon-organic hybrid modulator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(6): 1210-1216.
- [27] ULRICH R, ANKELE G. Self-imaging in homogeneous planar optical waveguides [J]. *Applied physics Letters*, 1975, 27(6): 337-339.