

双层硅基马赫-曾德尔电光调制器的动态性能

宋牟平 谢 杭 杨纪超

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 硅光波导和光子器件具有大折射率差和紧凑尺寸, 硅光子被认为是新一代大规模光电集成技术。基于自由载流子等离子体色散效应, 采用 MOS 电容电极结构的马赫-曾德尔调制器(MZM), 可实现 10 GHz 以上的高速调制。采用有限元方法, 通过构建光和电结合模拟方法, 对一种双硅层的 MOS 电容电极 MZM 的静态和动态性能进行了理论研究。研究表明, 在 -2 V 驱动电压作用下, 当掺杂粒子浓度为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 时, 有效折射率变化值为 1.05×10^{-5} 左右, 实现 V_{π} 所需的单臂调制臂长为 3.68 cm, 损耗小于 0.84 dB/cm, 其上升时间和下降时间在 40 ps 左右; 当掺杂粒子浓度为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 时, 其有效折射率变化只有 0.86×10^{-5} 左右, 实现 V_{π} 所需的单臂调制臂长需 4.51 cm, 损耗约为 1.36 dB/cm。当改变该调制器结构参数后, 其上升时间和下降时间会产生明显变化。

关键词 光学器件; 硅光子学; 马赫-曾德尔电光调制器; 电容电极; 动态性能

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s105001

Dynamic Performance of Silicon Mach-Zehnder Electro-Optic Modulator with Two Silicon Layers

Song Muping Xie Hang Yang Jichao

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Silicon photonics is a novel technique for large-scale optic-electronic integration, with which most kinds of optical devices can be designed. Based on free-carrier plasma dispersion, silicon Mach-Zehnder electro-optic modulator (MZM) can achieve high modulation speed over 10 GHz. Considering the need for modulation speed and power consumption, a kind of silicon MZM based on MOS capacitor electrodes is studied by a simulation method combining electric and optic analytic model. The results show that under the driving voltage of -2 V, when the doping concentration is $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, the effective refractive index change of the optical waveguide in silicon MZM is about 1.05×10^{-5} , which results in single modulation arm length of 3.68 cm to realize V_{π} and the loss of less than 0.84 dB/cm. When doping concentration is $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, the effective refractive index change is only 0.86×10^{-5} , which results in the V_{π} length of 4.51 cm and the loss of about 1.36 dB/cm. And varied capacitor electrode structures of silicon MZM may make the visible difference of the modulation performance, including the rise and fall time.

Key words optical device; silicon photonics; Mach-Zehnder electro-optic modulator; capacitor electrode; dynamic performance

OCIS codes 230.2090; 230.4110; 060.4510

1 引 言

硅的折射率约为 3.45, 可构成高折射率差光波导, 是实现微(纳)米光子器件的理想材料^[1~4]。而且硅对红外通信光波段的光是“透明”的^[5], 同时, 硅是一种成本低廉、制作和加工工艺成熟的半导体材料, 硅基光波导器件已成为近期国内外的研究热点。但硅属于中心反演对称的晶体, 没有一阶电光效应,

难以实现电光调制。在 1983 年, M. Willander^[6] 实验验证了硅材料的载流子等离子体色散效应相当显著, 自由载流子等离子体色散效应指的是载流子的注入或抽取会导致半导体折射率发生变化, 从而实现电光调制。

光调制器/开关是一类重要的硅基光波导器件。在基于自由载流子等离子体色散效应的硅基马赫-曾

收稿日期: 2011-07-15; 收到修改稿日期: 2011-09-02

作者简介: 宋牟平(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要从事硅光子器件、光纤通信/传感等方面的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn

德尔电光调制器(MZM)中,调制臂在驱动电压的作用下进行自由载流子的注入/抽取,自由载流子等离子色散效应改变硅波导的折射率,从而改变入射光的相位,通过构成干涉仪完成光幅度调制。在近年来硅基电光调制器结构的研究中,在理论研究、器件设计与制作等方面都取得了一系列成果^[7~13]。如 Ling Liao 等^[9~11]利用成熟的 CMOS 工艺制作出了基于 MOS 电容电极的硅基 MZM,实现了调制速率达到 10 GHz 的电光调制器。C. A. Barrios 等^[12,13]提出了一系列用于 MZM 的硅波导结构。

基于 MOS 电容电极的硅基 MZM 与实际应用最广的 CMOS 工艺兼容,可实现 10 GHz 以上的调制速度,且具有静态零功耗的特点。但由于涉及电和光两方面的结构,难以进行有效的分析和设计,本文采用半导体载流子迁移和扩散方程结合光模式场分析,对 MOS 电容电极的硅基 MZM 调制特性进行了研究。研究表明,有效折射率的变化随电压呈线性变化趋势,同时损耗也随着变化,而且在不同的电极结构下,调制性能有明显差异。

2 工作原理

如图 1 所示,采用文献[13]提出的一种基于 MOS 电容电极的双层硅条硅基 MZM 结构。下硅层高度 $h_d=60$ nm,上硅层高度 $h_u=120$ nm,两硅层间距离 $h_b=20$ nm,二氧化硅(Silica)的折射率 $n_{\text{SiO}_2}=1.46$,硅(Si)的固有折射率 $n_{\text{Si}}=3.44$ 。其电结构是 MOS 电容,通过加载驱动电压,来改变电容器电荷即硅的自由载流子;其光结构是脊状硅光波导,存在准 TE 模或/和准 TM 模。

在调制器中,电子和空穴的分布可以由以下载

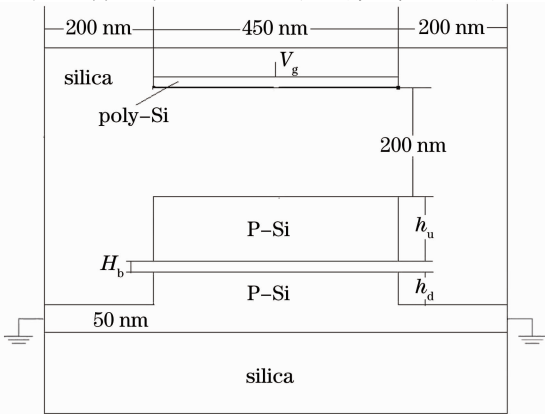


图 1 基于 MOS 电容电极的 MZM 波导模型横截面
Fig. 1 Cross section of the silicon MZM with MOS capacitor electrode

流子迁移和扩散方程^[7]求得:

$$\epsilon_0 \epsilon_r (\nabla \Psi) = q(N_e - N_h - c), \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\mu_p v_T \nabla N_h + \mu_n N_h \nabla \Psi) = R_{\text{SRH}}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\mu_n v_T \nabla N_e + \mu_n N_e \nabla \Psi) = R_{\text{SRH}}, \quad (3)$$

式中 R_{SRH} 是肖克莱里德霍尔复合率(Shockley-Hall-Read recombination rate), ϵ_0 和 ϵ_r 分别是真空介电常数和相对介电常数, q 是基本电荷, N_e 和 N_h 分别是电子和空穴的分布, μ_n 和 μ_p 分别是电子和空穴的迁移率, v_T 是热电压, Ψ 是电势能, c 是掺杂粒子浓度。

而边界的空穴和电子分布,以及电势能可以表示为

$$\Psi = V_g + v_T \ln \left[\frac{1}{N_i} \left(\frac{c}{2} + \sqrt{\left(\frac{c}{2} \right)^2 + N_i^2} \right) \right], \quad (4)$$

$$N_e = \frac{c}{2} + \sqrt{\left(\frac{c}{2} \right)^2 + N_i^2}, \quad (5)$$

$$N_h = -\frac{c}{2} + \sqrt{\left(\frac{c}{2} \right)^2 + N_i^2}, \quad (6)$$

式中 N_i 是硅具有的固有载流子浓度, V_g 是外加的驱动电压。

当在波导上方加上驱动电压后,由于自由载流子等离子色散效应,硅的折射率发生变化,同时损耗也发生变化。折射率以及损耗改变可以表示为^[14]

$$\Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h = -[8.8 \times 10^{-22} \cdot \Delta N + 8.5 \times 10^{-18} \cdot (\Delta P)^{0.8}], \quad (7)$$

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_e + \Delta \alpha_h = 8.5 \times 10^{-18} \cdot \Delta N + 6.0 \times 10^{-18} \cdot \Delta P, \quad (8)$$

式中 ΔN 表示电子浓度改变量; ΔP 表示空穴浓度改变量; Δn_e 表示因电子浓度改变而改变的折射率; Δn_h 表示因空穴浓度改变而改变的折射率; $\Delta \alpha_e$ 表示因电子浓度改变而改变的损耗; $\Delta \alpha_h$ 表示因空穴浓度改变而改变的损耗。

在得到因驱动电压而改变的折射率和损耗的基础上,采用有限元方法进行光模式场分析,可计算得到硅基 MZM 的光波导传播常数或有效折射率的变化,从而得到硅基 MZM 的调制性能。

3 研究结果

3.1 稳态结果

设定光波长为 $1.55 \mu\text{m}$, 在一定的驱动电压作用下,在图 1 所示的硅基 MZM 光波导中,不同的掺杂浓度和电极结构(下硅层高度 h_d , 上硅层高度 h_u 与两者相关联的两层间距离 h_b)会产生不同的载流子分布变化,从而影响调制器的电-光性能。

3.1.1 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=120 \text{ nm}$, $h_b=20 \text{ nm}$

在掺杂粒子浓度为 10^{15} cm^{-3} 的条件下,采用有限元方法计算了光波导在 V_g 为 -2 V 时的空穴分布;光波导的有效折射率和损耗(未考虑加工工艺引起的损耗);最后计算得到硅光波导的准 TE 基模及传播常数 K_z 。表 1 是在不同电压下,获得的传播方向上的 $K_z(-\alpha-i\beta)$ 值。

表 1 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=120 \text{ nm}$, $h_b=20 \text{ nm}$ 时不同驱动电压下的 K_z 值

Table 1 K_z with different applied voltages when $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=120 \text{ nm}$, $h_b=20 \text{ nm}$

V_g/V	K_z
-0.00	$-0.023226-i9.261841 \times 10^6$
-1.00	$-0.033733-i9.261801 \times 10^6$
-1.20	$-0.038297-i9.261791 \times 10^6$
-1.40	$-0.042992-i9.261781 \times 10^6$
-1.60	$-0.045530-i9.261773 \times 10^6$
-1.80	$-0.047954-i9.261765 \times 10^6$
-2.00	$-0.052461-i9.261756 \times 10^6$

波导的有效折射率 n_{eff} 可以通过公式 $n_{\text{eff}} = \lambda\beta / (2\pi)$ 求得。图 2 是经计算得到的不同驱动电压下的有效折射率值以及线性回归直线。

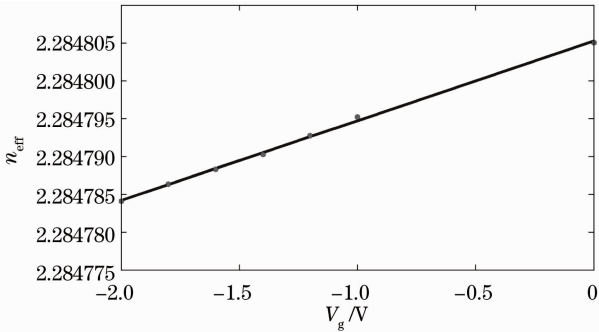


图 2 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=120 \text{ nm}$, $h_b=20 \text{ nm}$ 时有效折射率与驱动电压的关系

Fig. 2 Effective refractive index the applied voltage when $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=120 \text{ nm}$, $h_b=20 \text{ nm}$

从图中可以看出,不同电压下的有效折射率近似呈线性变化趋势,其变化系数 $(\Delta n_{\text{eff}} / \Delta V_g)$ 为 1.054064×10^{-5} 。半波驱动电压与臂长的关系式为

$$V_\pi L_\pi = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{\Delta |V_g|} \right)^{-1}. \quad (9)$$

在 V_π 取 -2 V 时,其臂长 L_π 为 3.68 cm 。

硅波导的损耗系数就是 K_z 的实数项 α ,可以求得在电压为 -2 V 时,硅波导的单位损耗为 0.2278 dB/cm 。在硅基 MZM 调制臂长 L_π 为 3.68 cm 时,其损耗为 0.84 dB 左右。

3.1.2 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=130 \text{ nm}$, $h_b=10 \text{ nm}$

在掺杂浓度不变的情况下,取 $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=130 \text{ nm}$, $h_b=10 \text{ nm}$,在驱动电压为 -2 V 时得到准 TE 模式场。与 $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=120 \text{ nm}$, $h_b=20 \text{ nm}$ 的波导模型的模式场相比,场中心更加收敛,场能更多的被限制在上层的硅中。不同驱动电压下的 K_z 值如表 2 所示。

表 2 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=130 \text{ nm}$, $h_b=10 \text{ nm}$ 时不同驱动电压下的 K_z 值

Table 2 K_z with different applied voltages when $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=130 \text{ nm}$, $h_b=10 \text{ nm}$

V_g/V	K_z
-0.00	$-0.023813-i9.562098 \times 10^6$
-1.00	$-0.040279-i9.562051 \times 10^6$
-1.20	$-0.043427-i9.562042 \times 10^6$
-1.40	$-0.048518-i9.562031 \times 10^6$
-1.60	$-0.053630-i9.562020 \times 10^6$
-1.80	$-0.059061-i9.562010 \times 10^6$
-2.00	$-0.064287-i9.561999 \times 10^6$

图 3 是经计算得到的不同驱动电压下的有效折射率值以及线性回归直线。从图中可以看出,不同电压下的有效折射率近似呈线性变化,其变化系数 $(\Delta n_{\text{eff}} / \Delta V_g)$ 为 1.219239×10^{-5} 。在 V_π 取 -2 V 时,其臂长 L_π 为 3.18 cm 。经过比较,可以发现其变化系数比波导参数为 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=120 \text{ nm}$, $h_b=20 \text{ nm}$ 时的变化系数要大,相应地,在相同电压下,其耦合臂的臂长要小于波导参数为 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=120 \text{ nm}$, $h_b=20 \text{ nm}$ 时的耦合臂臂长。

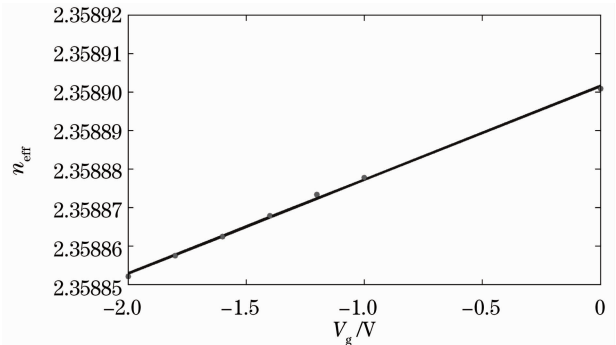


图 3 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=130 \text{ nm}$, $h_b=10 \text{ nm}$ 时有效折射率与驱动电压的关系

Fig. 3 Effective refractive index with the applied voltage $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=130 \text{ nm}$, $h_b=10 \text{ nm}$

对于硅波导的损耗系数,可以求得在电压为 -2 V 时,硅波导单位损耗为 0.2792 dB/cm 。在硅

基 MZM 调制臂长 L_π 为 3.18 cm 时,其损耗为 0.89 dB 左右。经过比较,可以发现其总损耗与波导参数为 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=60 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=20 \text{ nm}$ 时的损耗相当。

3.1.3 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=70 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=10 \text{ nm}$

在掺杂浓度不变的情况下,取 $h_d=70 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=10 \text{ nm}$,在驱动电压为 -2 V 时得到准 TE 模式场。与 $h_d=60 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=20 \text{ nm}$ 的波导模型的模式场相比,场中心更加收敛,场能更多的被限制在下层的硅中。不同驱动电压下的 K_z 值如表 3 所示。

表 3 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=70 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=10 \text{ nm}$ 时不同驱动电压下的 K_z 值

Table 3 K_z with different applied voltages when $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=70 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=10 \text{ nm}$

V_g/V	K_z
-0.00	$-0.023825 - i9.563255 \times 10^6$
-1.00	$-0.043307 - i9.563202 \times 10^6$
-1.20	$-0.051316 - i9.563187 \times 10^6$
-1.40	$-0.056557 - i9.563176 \times 10^6$
-1.60	$-0.060924 - i9.563166 \times 10^6$
-1.80	$-0.066120 - i9.563155 \times 10^6$
-2.00	$-0.074043 - i9.563141 \times 10^6$

图 4 是经计算得到的不同驱动电压下的有效折射率值以及线性回归直线。从图中可以看出,不同电压下的有效折射率近似呈线性变化趋势,其变化系数 ($\Delta n_{\text{eff}}/\Delta V_g$) 为 1.397285×10^{-5} 。在 V_π 取 -2 V 时,其臂长 L_π 为 2.77 cm。经过比较,可以发现其变化系数比波导参数为 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=60 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=20 \text{ nm}$ 时的变化系数要大,相应地,在相同电压下,其耦合臂的臂长要小于

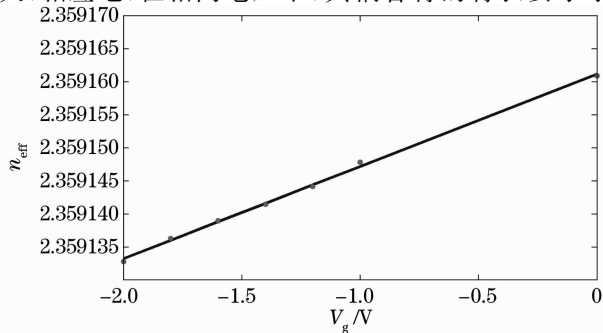


图 4 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=70 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=10 \text{ nm}$ 时有效折射率与驱动电压的关系

Fig. 4 Effective refractive index with the applied voltage when $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=70 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=10 \text{ nm}$

波导参数为 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=60 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=20 \text{ nm}$ 时的耦合臂臂长。

对于硅波导的损耗系数,可以求得在电压为 -2 V 时,硅波导单位损耗为 0.3216 dB/cm。在硅基 MZM 调制臂长 L_π 为 2.77 cm 时,其损耗为 0.89 dB 左右。经过比较,可以发现其总损耗与波导参数为 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=60 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=20 \text{ nm}$ 时的损耗相当。

3.1.4 $p=5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=60 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=20 \text{ nm}$

在波导横截面参数保持不变的情况下,将硅的掺杂浓度由 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 提高到 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,在驱动电压为 -2 V 时得到准 TE 模式场。其模式场与波导参数为 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 时的模式场相同。不同驱动电压下的 K_z 值如表 4 所示。

表 4 $p=5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=60 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=20 \text{ nm}$ 时不同驱动电压下的 K_z 值

Table 4 K_z with different applied voltages when $p=5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=60 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=20 \text{ nm}$

V_g/V	K_z
-0.00	$-0.041252 - i9.261765 \times 10^6$
-1.00	$-0.054305 - i9.261731 \times 10^6$
-1.20	$-0.055928 - i9.261722 \times 10^6$
-1.40	$-0.062211 - i9.261716 \times 10^6$
-1.60	$-0.061670 - i9.261709 \times 10^6$
-1.80	$-0.066565 - i9.261702 \times 10^6$
-2.00	$-0.069187 - i9.261696 \times 10^6$

图 5 是经计算得到的不同驱动电压下的有效折射率值以及线性回归直线。从图中可以看出,不同电压下的有效折射率近似呈线性变化趋势,其变化系数 ($\Delta n_{\text{eff}}/\Delta V_g$) 为 0.858589×10^{-5} 。在 V_π 取 -2 V 时,其臂长 L_π 为 4.51 cm。经过比较,可以发

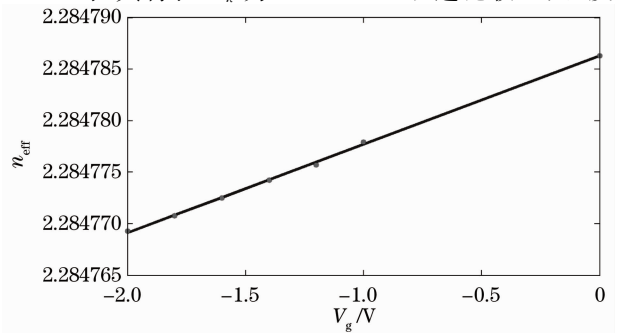


图 5 $p=5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=60 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=20 \text{ nm}$ 时有效折射率与驱动电压的关系

Fig. 5 Effective refractive index with the applied voltage when $p=5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=60 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=20 \text{ nm}$

现其变化系数比波导参数为 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=120 \text{ nm}$, $h_b=20 \text{ nm}$ 时的变化系数要小,相应地,在相同电压下,其耦合臂的臂长要大于波导参数为 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=120 \text{ nm}$, $h_b=20 \text{ nm}$ 时的耦合臂臂长。

对于硅波导的损耗系数,可以求得在电压为 -2 V 时,硅波导单位损耗为 0.3005 dB/cm 。在硅基 MZM 调制臂长为 4.51 cm 时,其损耗为 1.36 dB 左右。经过比较,可以发现其总损耗要大于与波导参数为 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=120 \text{ nm}$, $h_b=20 \text{ nm}$ 时的损耗。

3.2 瞬态结果

假设低电压状态下的有效折射率 n_l 与高电压状态下的有效折射率 n_h 之差为 Δn ,则在低电压突变到高电压时,有效折射率从 $(n_l + 10\% \Delta n)$ 到 $(n_h - 10\% \Delta n)$ 所需要的时间就是上升时间 t_u ;反之,在高电压突变到低电压时,有效折射率从 $(n_h - 10\% \Delta n)$ 到 $(n_l + 10\% \Delta n)$ 所需要的时间就是下降时间 t_d 。在计算了稳态情况下的有效折射率变化情况和损耗情况的基础上,利用有限元的方法,计算了上述四种模型在驱动电压为 -2 V 时的上升时间和下降时间,见表 5。

表 5 取不同 p, h_b, h_d 和 h_u 时的 t_u 和 t_d

Table 5 t_u and t_d with different p, h_b, h_d and h_u

	t_u/ps	t_d/ps
$p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=60 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=20 \text{ nm}$	44	42
$p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=70 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=10 \text{ nm}$	>1000	>1000
$p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=60 \text{ nm}, h_u=130 \text{ nm}, h_b=10 \text{ nm}$	>1000	>1000
$p=5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}, h_d=60 \text{ nm}, h_u=120 \text{ nm}, h_b=20 \text{ nm}$	28	36

空穴和电子的迁移率随浓度的变化而变化^[15],但因为涉及的空穴和电子浓度在变化范围内的相应迁移率变化不大,所以这里固定空穴和电子迁移率以方便计算。

从表 5 中可以看出,在波导参数为 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_d=60 \text{ nm}$, $h_u=120 \text{ nm}$, $h_b=20 \text{ nm}$ 的基础结构时随着掺杂浓度的增加,上升时间和下降时间都明显减小,在此结构参数下,波导的上升时间和下降时间能够保持在皮秒量级,可以达到吉赫兹的转换频率。而在狭缝减小的情况下,上升时间和下降时间都显著增加,都达到了纳秒量级,相比之下其转换速率就要慢两个数量级。

4 结 论

基于 MOS 电容电极的硅基马赫-曾德尔电光调制器可实现高速调制,是一类重要的硅光子器件。采用半导体载流子迁移和扩散方程结合光模式场进行模拟研究,得到了 MOS 电容电极双层硅基 MZM 的调制性能。结果表明在不同的掺杂浓度和尺寸下,其调制性能,包括上升时间和下降时间,都产生明显的变化。因此在实际制作器件时,要根据对尺寸大小、损耗和调制频率的要求选择适当的掺杂浓度和波导横截面参数,才能实现有效的高速电光调制。

参 考 文 献

- 1 A. Barkai, Y. Chetrit, O. Cohen *et al.*. Integrated silicon photonics for optical networks [J]. *J. Optical Networking*, 2007, **6**(1): 25~47
- 2 B. Jalali, S. Fathpour. Silicon photonics [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4600~4614
- 3 Tang Yanzhe, Wang Yuelin, Wu Yaming. Transition loss and polarization effect in planar lightwave circuits based on silicon-on-insulator rib waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 203~207
唐衍哲, 王跃林, 吴亚明. 硅基脊型波导器件过渡区损耗及偏振效应 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 203~207
- 4 Jia Xiaoling, Gao Fan, Zhang Feng. Design and optimization of a new type 3×3 silicon-on-insulator multimode interference optical switch [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1208~1213
贾晓玲, 高凡, 张峰. 新型 SOI 基 3×3 多模干涉波导光开关的优化设计 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1208~1213
- 5 Robert Hull. Properties of Crystalline Silicon, emis DataReviews Series No 20 [M]. London: INSPEC, IEE, 1999. 677~696
- 6 M. Willander. Carrier dependent parameters in a silicon optical waveguide [J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(8): 4660~4663
- 7 Vittorio. M. N. Passaro, Francesco Dell' Olio. Scaling and optimization of MOS optical modulators in nanometer SOI waveguides [J]. *IEEE Trans. Nanotechnology*, 2008, **7**(4): 401~408
- 8 Assia Barkai, Yoel Chetrit, Oded Cohen *et al.*. Integrated silicon photonics for optical networks [J]. *J. Optical Networking*, 2007, **6**(1): 25~47
- 9 Ling Liao, Dean Samara-Rubio, Michael Morse *et al.*. High speed silicon Mach-Zehnder modulator [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 3129~3135
- 10 Dean Samara-Rubio, Ulrich D. Keil, Ling Liao *et al.*. Customized drive electronics to extend silicon optical modulators to 4 Gb/s [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(12): 4305~4314
- 11 Ansheng Liu, Richard Jones, Ling Liao *et al.*. A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor [J]. *Nature*, 2004, **427**(6975): 615~618
- 12 C. A. Barrios, M. Lipson. Modeling and analysis of high-speed electro-optic modulation in high confinement silicon waveguides using metal-oxide-semiconductor configuration [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **96**(11): 6008~6015
- 13 Carlos Angulo Barrios. Electrooptic modulation of multisilicon-on-insulator photonic wires [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(5): 2146~2155
- 14 R. A. Soref, B. R. Bennett. Kramers-Kronig analysis of electro-optical switching in silicon [C]. *SPIE*, 1987, **704**: 32~37
- 15 S. M. Sze, Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices [M]. Geng Li, Zhang Ruizhi. Transl.. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2008. 21~22
S. M. Sze, Kwok K. Ng. 半导体器件物理 [M]. 耿丽, 张瑞智译. 西安: 西安交通大学出版社, 2008. 21~22