

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0141-06

基于 MOS 电容电极的硅基马赫-曾德尔 电光调制器的性能研究

杨纪超 宋牟平

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 硅光子是新一代大规模光/电集成技术,可实现各种常见光器件,其中基于自由载流子等离子体色散效应的硅基马赫-曾德尔电光调制器(MZM),可实现 10 GHz 以上的调制速度。在硅基 MZM 中,一个关键技术是采用合适的电极结构使自由载流子浓度产生有效的变化,以达到调制所需的有效折射率变化。考虑到调制速度和功耗的要求,对一种基于 MOS 电容电极的 MZM 进行了光电结合模拟研究。研究表明,在 -1.5 V 驱动电压作用下,当掺杂体积分数为 10^{15} cm^{-3} 时,有效折射率变化值为 3.82×10^{-6} 左右,实现半波电压 V_{π} 所需的单臂调制臂长为 13.5 cm,损耗小于 0.04 dB/cm;而当掺杂体积分数为 10^{18} cm^{-3} 时,其有效折射率变化可达 6.96×10^{-5} 左右,实现 V_{π} 所需的单臂调制臂长只需 0.7 cm,但损耗约为 24.8 dB/cm。而且在不同的电极结构下,调制性能有明显的差异,其有效折射率变化达 1.53×10^{-5} 左右,实现 V_{π} 所需的单臂调制臂长需 3.3 cm,但损耗只有 0.09 dB/cm。

关键词 光学器件;硅光子;马赫-曾德尔电光调制器;电容电极;自由载流子

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0141

Study on Performances of Silicon Mach-Zehnder Electro-Optic Modulator Based on MOS Capacitor Electrodes

Yang Jichao Song Muping

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

Abstract Silicon photonics is a novel technique for high 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. For silicon MZM, one of the critical techniques is how to effectively change the free carrier concentration in order to obtain the needed modification of the optical refractive index. Considering the need for modulation speed and power consumption, a kind of silicon MZM based on metal-oxide-semiconductor(MOS) capacitor electrodes is studied by a simulation method combining electric and optic analytic mode. The results show that under the driving voltage of -1.5 V, when the doping concentration is 10^{15} cm^{-3} , the effective refractive index change of the optical waveguide in silicon MZM is about 3.82×10^{-6} , which result in the V_{π} length of 13.5 cm and the loss of less than 0.04 dB/cm. When doping concentration is 10^{18} cm^{-3} , the effective refractive index change can reach 6.96×10^{-5} , which result in the V_{π} length of 0.7 cm and the loss of about 24.8 dB/cm. Varied capacitor electrode structures of silicon MZM may make the visible difference of the modulation performance, and its effective refractive index change may reach 1.53×10^{-5} , which result in the V_{π} length of 3.3 cm and the loss of about 0.09 dB/cm.

Key words optical devices; silicon photonics; Mach-Zehnder electro-optic modulator; capacitor electrode; free carrier

收稿日期: 2010-04-08; 收到修改稿日期: 2010-06-07

作者简介: 杨纪超(1985—),男,硕士研究生,主要从事硅光子器件方面的研究。E-mail: yangjichao-1985@163.com

导师简介: 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(通信联系人)

1 引 言

硅的折射率约为 3.45,远大于二氧化硅的折射率(约为 1.45),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]。虽然在一般情况下,硅不能发光,光电效应差,难以对通信光进行探测。但是,硅对红外通信光波段的光是“透明”的,损耗几乎为零^[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研究热点。

光调制器/开关是一重要的硅光子器件,硅基光调制/开关技术主要有热光和电光两种。硅是一种很好的热光调制材料,具有大的热光系数和高的热导率,基于硅的热光调制的响应速度比其他材料(如二氧化硅和聚合物)要快,可以达到微秒量级甚至更小。同时,硅属于中心反演对称的晶体,没有一阶线性电光效应,难以实现电光调制。但是在 1983 年,瑞典皇家工学院的 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。虽然制作硅电光调制器涉及电和光两方面结构,工艺复杂,难度大,但是电光调制器可以实现纳秒量级的开关速度,是其他技术难以达到的。

在基于自由载流子等离子体色散效应的硅基马赫-曾德尔电光调制器(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,自由载流子等离子体色散效应改变硅波导的折射率,从而改变入射光的相位,最后通过构成干涉仪结构完成光幅度调制。在近年来硅基电光调制器结构的研究中^[7~13],对 PIN(或 PN)结构、双极型场效应晶体管(BMFET)和金属氧化物半导体(MOS)等电结构的理论研究、器件设计与制作都取得了一系列成果。如 Ansheng Liu 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,有效折射率随电压呈线性变化,同时损耗也随着变化,而且在不同的电极结

构下,调制性能有明显的差异。

2 原 理

如图 1 所示,采用文献[13]提出的一种基于 MOS 电容电极的硅基 MZM 结构。图中 $h_d = 60 \text{ nm}$, $h_m = 60 \text{ nm}$, $h_u = 40 \text{ nm}$, $h_b = 20 \text{ nm}$,二氧化硅(Silica)的折射率取 $n_{\text{silio}_2} = 1.46$,硅(Si)的固有折射率取 $n_{\text{si}} = 3.44$ 。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(空穴和电子);其光结构是脊状硅光波导,存在准 TE 模或/和准 TM 模。

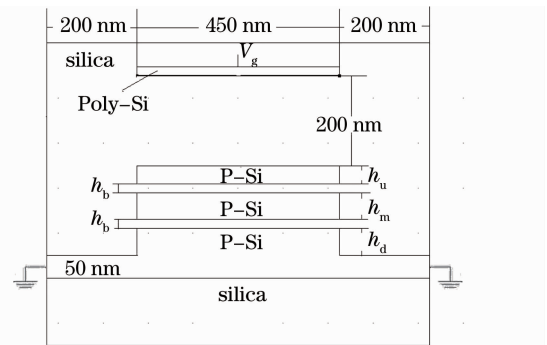


图 1 基于 MOS 电容电极的 MZM 波导模型横截面
Fig. 1 Cross section of the silicon MZM with MOS capacitor electrode

在具有 MOS 电容电极结构的硅基电光调制器中,电子和空穴的分布是由驱动电压决定的,可以由下载流子迁移和扩散方程^[7]求得

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

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

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

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 是掺杂体积分数。

而边界的空穴和电子分布,以及电势能可表示为

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

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

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

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。

当在波导上方重掺杂多晶硅(具有大导电率)处加上驱动电压后,由于自由载流子等离子体色散效应,硅的折射率发生变化,同时损耗也发生变化。折射率的改变以及损耗的改变可以表示为^[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 结果与讨论

设定光波长为 $1.55 \mu\text{m}$, 在 1 V 左右的驱动电压作用下,在图 1 所示的硅基 MZM 光波导中,不同的掺杂体积分数和电极结构(如硅层之间的距离 h_b)会产生不同的载流子变化,从而影响调制器的电/光性能。虽然调制电压越大,器件有效折射率的变化也越大,但是集成的电光调制器需要低功耗,因此以下采用 1 V 左右的驱动电压,以降低调制器的消耗功率。

3.1 掺杂体积分数 $p = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_b = 20 \text{ nm}$

在掺杂体积分数为 10^{15} cm^{-3} 的条件下,根据(1)~(6)式计算了图 1 所示的硅基 MZM 光波导在 V_g 为 -1.5 V 时的空穴分布,如图 2 所示;再利用(7),(8)式求得硅光波导的有效折射率和损耗(未考虑加工工艺引起的损耗);最后采用有限元方法计算得到硅光波导的准 TE 基模,如图 3 所示,并可分析得到该模式场的传播常数。

在驱动电压作用下,硅与二氧化硅交界的硅一侧,自由载流子的浓度变化非常大,在几纳米的长度内可以有 $1 \sim 2$ 个数量级的变化,因此在图 2 中难以清楚显示全部的载流子浓度变化。从图 3 可以看出,其基模是准 TE 模,被限制在波导的中心传播。表 1 是在不同电压下获得的传播方向上的复传播常数 $K_z (-\alpha - \beta i)$ 值。

表 1 掺杂体积分数为 10^{15} cm^{-3} , $h_b = 20 \text{ nm}$ 的情况下

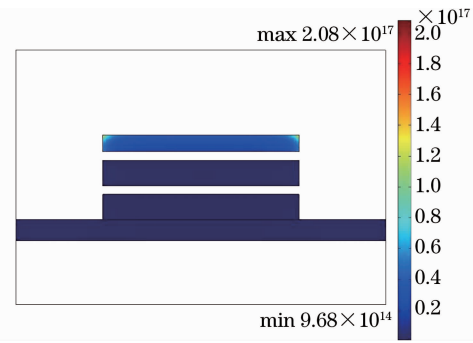


图 2 当 $p = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_b = 20 \text{ nm}$, $V_g = -1.5 \text{ V}$ 时的空穴分布

Fig. 2 Hole distribution when the doping concentration is 10^{15} cm^{-3} , $h_b = 20 \text{ nm}$, $V_g = -1.5 \text{ V}$

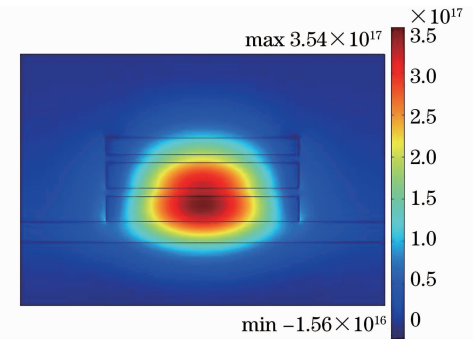


图 3 当 $p = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_b = 20 \text{ nm}$ 时准 TE 模的场图

Fig. 3 TE-like fundamental mode profile when the doping concentration is 10^{15} cm^{-3} , $h_b = 20 \text{ nm}$ 不同驱动电压下的 K_z 值

Table 1 K_z with different applied voltages when the doping concentration is 10^{15} cm^{-3} , $h_b = 20 \text{ nm}$

V_g / V	K_{z1}	K_{z2}
-0.30	-0.008724-	-0.010001-
	$8.896099 \times 10^6 i$	$8.896099 \times 10^6 i$
-0.60	-0.007733-	-0.009039-
	$8.896094 \times 10^6 i$	$8.896092 \times 10^6 i$
-0.90	-0.008915-	-0.007055-
	$8.896087 \times 10^6 i$	$8.896093 \times 10^6 i$
-1.20	-0.007132-	-0.007417-
	$8.896086 \times 10^6 i$	$8.896083 \times 10^6 i$
-1.50	-0.007331-	-0.007011-
	$8.896079 \times 10^6 i$	$8.896081 \times 10^6 i$

硅波导的传播常数就是 K_z 的虚数项 β , 而其有效折射率 n_{eff} 与 β 存在线性关系, 可以通过公式 $n_{\text{eff}} = \lambda \cdot \beta / 2\pi$ 求得。图 4 是经过计算之后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

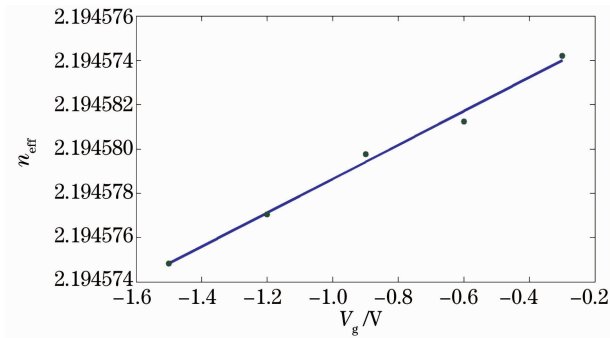


图4 掺杂体积分数为 10^{15} cm^{-3} , $h_b = 20 \text{ nm}$ 时有效折射率和驱动电压的关系

Fig. 4 Effective index with the applied voltage when the doping concentration is 10^{15} cm^{-3} , $h_b = 20 \text{ nm}$

3.8236975×10^{-6} 。半波驱动电压与臂长的关系为

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

在 V_π 取 -1.5 V 时,其臂长 L_π 为 13.5 cm 。

硅波导的损耗系数就是 K_z 的实数项 α , 转换成对数形式的损耗如图5所示,可看出具有线性关系,变化不大且值都小于 0.04 dB/cm 。在硅基 MZM 调制臂长 L_π 为 13.5 cm 时,其损耗只有 0.6 dB 左右。

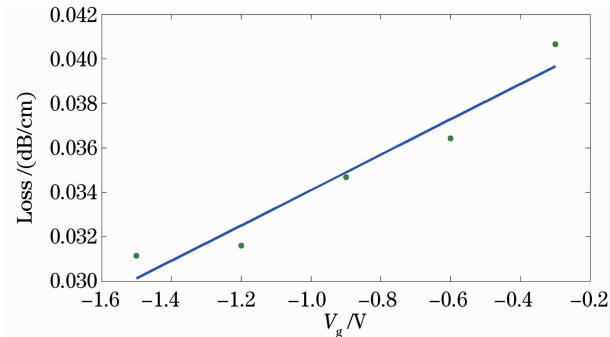


图5 掺杂体积分数为 10^{15} cm^{-3} , $h_b = 20 \text{ nm}$ 时损耗和驱动电压的关系

Fig. 5 Loss with the applied voltage when the doping concentration is 10^{15} cm^{-3} , $h_b = 20 \text{ nm}$

3.2 掺杂体积分数 $p = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $h_b = 20 \text{ nm}$

改变掺杂体积分数为 $p = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 得到的准 TE 模式场与掺杂体积分数为 10^{15} cm^{-3} 时的模式场(如图3所示)相似,其在不同驱动电压下的 K_z 值如表2所示。

图6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,其变化系数为 6.9566626×10^{-5} 。在 V_π 取 -1.5 V 时,其臂长 L_π 为 0.7 cm 。

表2 掺杂体积分数为 $p = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $h_b = 20 \text{ nm}$ 情况下不同驱动电压下的 K_z 值

Table 2 K_z with different applied voltages when the doping concentration is $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $h_b = 20 \text{ nm}$

V_g/V	K_z
-0.30	$-5.716015 - 8.896078 \times 10^6 i$
-0.60	$-5.716008 - 8.896000 \times 10^6 i$
-0.90	$-5.716022 - 8.895941 \times 10^6 i$
-1.20	$-5.715978 - 8.895834 \times 10^6 i$
-1.50	$-5.715988 - 8.895738 \times 10^6 i$

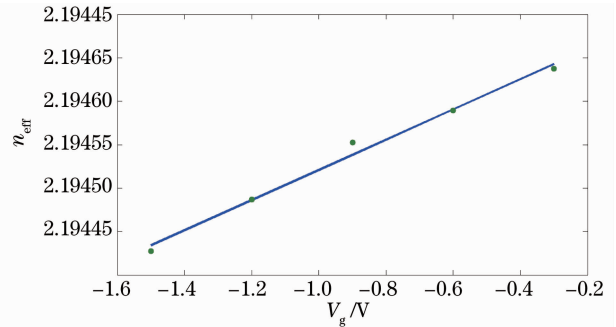


图6 掺杂体积分数为 $p = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $h_b = 20 \text{ nm}$ 时有效折射率和驱动电压的关系

Fig. 6 Effective index with the applied voltage when the doping concentration is $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $h_b = 20 \text{ nm}$

计算得到的损耗如图7所示。从图7可以看出,损耗值较大,约为 24.8 dB/cm ,但损耗的变化不大。这是因为加上驱动电压之后,自由载流子数量的变化相对于其掺杂体积分数显得很小,对波导损耗的影响不大。在硅基 MZM 调制臂长 L_π 为 0.7 cm 时,其损耗有 17.4 dB 左右。

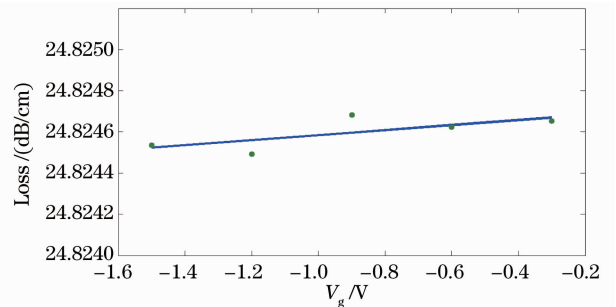


图7 掺杂体积分数为 $p = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $h_b = 20 \text{ nm}$ 时损耗和驱动电压的关系

Fig. 7 Loss against the applied voltage when the doping concentration is $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $h_b = 20 \text{ nm}$

3.3 掺杂体积分数 $p = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_b = 10 \text{ nm}$

硅层之间的间距改为 $h_b = 10 \text{ nm}$, 掺杂体积分数为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 在驱动电压为 -1.5 V 时的空穴分布如图8所示。准 TE 模式场图如图9所示,与 $h_b = 20 \text{ nm}$ 的模式场相比,场中心略有上移。不同

驱动电压下的 K_z 值如表 3 所示。

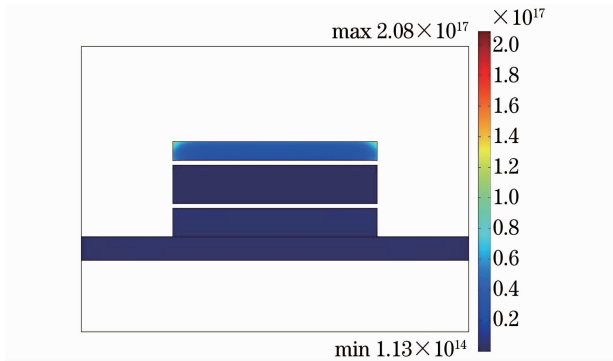


图 8 当 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_b=10 \text{ nm}$, $V_g=-1.5 \text{ V}$ 时的空穴分布

Fig. 8 Hole distribution when the doping concentration is 10^{15} cm^{-3} , $h_b=10 \text{ nm}$, $V_g=-1.5 \text{ V}$

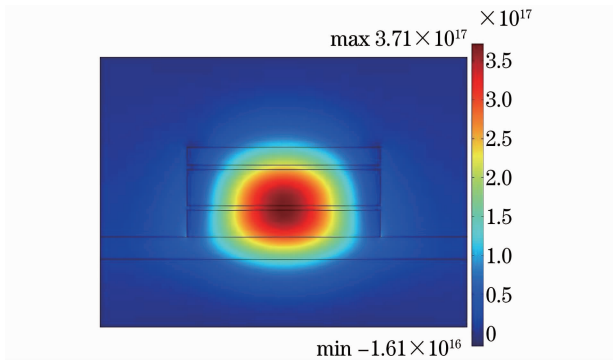


图 9 当 $p=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $h_b=10 \text{ nm}$ 时准 TE 模场图
Fig. 9 TE-like fundamental TE-like mode profile when the doping concentration is 10^{15} cm^{-3} , $h_b=10 \text{ nm}$

表 3 掺杂体积分数为 10^{15} cm^{-3} , $h_b=10 \text{ nm}$ 情况下不同驱动电压下的 K_z 值

Table 3 K_z with different applied voltages when the doping concentration is 10^{15} cm^{-3} , $h_b=10 \text{ nm}$

V_g/V	K_z
-0.30	$-0.007302-9.392729 \times 10^6 i$
-0.60	$-0.007924-9.392713 \times 10^6 i$
-0.90	$-0.012291-9.392688 \times 10^6 i$
-1.20	$-0.014541-9.392677 \times 10^6 i$
-1.50	$-0.019358-9.392654 \times 10^6 i$

图 10 是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,其变化系数为 1.5294790×10^{-5} 。在 V_g 取 -1.5 V 时,其臂长 L_π 为 3.3 cm 。

其计算之后的损耗如图 11 所示。从图上可以看出,损耗小于 0.09 dB/cm 。在硅基 MZM 调制臂长 L_π 为 3.3 cm 时,其损耗为 0.3 dB 左右。

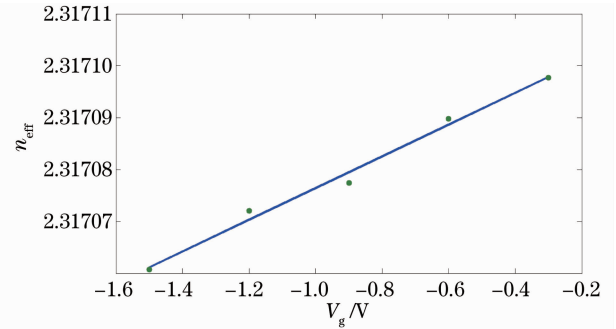


图 10 掺杂体积分数为 10^{15} cm^{-3} , $h_b=10 \text{ nm}$ 时有效折射率和驱动电压的关系

Fig. 10 Effective index with the applied voltage when the doping concentration is 10^{15} cm^{-3} , $h_b=10 \text{ nm}$

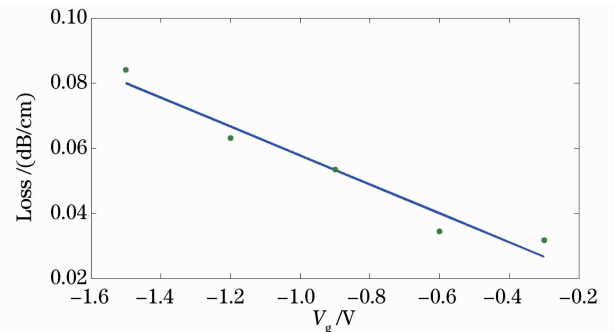


图 11 掺杂体积分数为 10^{15} cm^{-3} , $h_b=10 \text{ nm}$ 时损耗和驱动电压的关系

Fig. 11 Loss against the applied voltage when the doping concentration is 10^{15} cm^{-3} , $h_b=10 \text{ nm}$

4 结 论

基于 MOS 电容电极的硅基 MZM 可实现高速调制,是一重要的硅光子器件。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,可得到 MOS 电容电极硅基 MZM 的调制性能。研究结果表明,随着掺杂体积分数的增大,相同驱动电压下有效折射率的变化率明显增大,相应所需要的臂长减小,但是损耗显著增加。在实际制作器件时,可根据对尺寸大小和损耗的要求选择适当的掺杂体积分数。硅层间距的减小使波导在相同掺杂体积分数和驱动电压下,有效折射率的变化率明显增大,损耗基本相同,但这对加工工艺的要求相对增加。

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 [M]. London, UK: 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