

# SOI 全内反射型光波导电光开关模型研究\*

赵策洲\*\* 李国正 刘育梁\*\*\* 刘恩科 刘西钉

(西安交通大学电子工程系, 西安 710049)

**摘 要** 根据受抑全反射的光学隧道效应和 Goos-Hänchen 位移分析 SOI 全内反射型光波导电光开关中导模的传输和反射特性。在讨论等离子体色散效应, p-n 结大注入效应的基础上, 分析了全内反射光波导电光开关的电学性质。设计了该器件的结构参数和电学参数。

**关键词** 全内反射, SOI, 模型。

## 1 引 言

近年来, 随着硅光电集成和光子集成的提出, 硅波导调制/开关的发展很快, 已在硅材料上成功地研制出硅电光调制器<sup>[1]</sup>和非对称全内反射硅波导开关<sup>[2]</sup>。由于 SOI 波导对光限制很强, 波导传输损耗很小( $<1$  dB/cm)<sup>[3]</sup>, 光开关性能好, 因此目前把注意力由硅材料转移到了硅的 SOI 材料的光电集成方面, 并已研制出了 SOI 马赫-陈德尔干涉器<sup>[4]</sup>。由于对用于光电集成的 SOI 材料刚刚认识, 因此目前的主要工作还只是从理论上进行模型模拟分析<sup>[5]</sup>。针对 TIR 型光开关器件尺寸小, 工艺难度不大, 易于与半导体其它有源器件集成在同一芯片上, 易于制成大规模  $N \times N$  开关阵列, 目前对半导体全内反射型光开关的理论分析<sup>[6, 7]</sup>和器件研制<sup>[8]</sup>的报道相当多, 鉴于这些研究基本上都局限在化合物半导体上, 并且模型及设计方面的理论不是过于复杂<sup>[6]</sup>, 就是有不完善之处<sup>[7]</sup>, 因此本文针对 SOI 材料对半导体全内反射型光开关模型进行了重新考虑, 并对这种器件进行了设计。

## 2 SOI 全内反射开关模型

对于图 1(a)所示的 SOI 材料对称全内反射型光开关, 其交叉区光路传输与反射示意图如图 1(b)所示。

由等离子体色散效应可知<sup>[3]</sup>,  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$  时,  $n_1 = 3.505$ ,  $a_1 = 0.1 \text{ cm}^{-1}$ , 且

$$\left. \begin{aligned} n_0 &= n_1 - 6.0 \times 10^{-18} N_i^{0.8} - 6.2 \times 10^{-22} N_e, \\ a_0 &= a_1 + 2.8 \times 10^{-20} N_i^{1.3} + 5.9 \times 10^{-18} N_e; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

\* 国家教委博士点基金资助课题。

\*\* 现工作单位: 西安电子科技大学微电子所, 西安 710071。

\*\*\* 现工作单位: 中国科学院半导体研究所博士后流动站, 北京 100083。

收稿日期: 1994年10月2日; 收到修改稿日期: 1995年4月2日

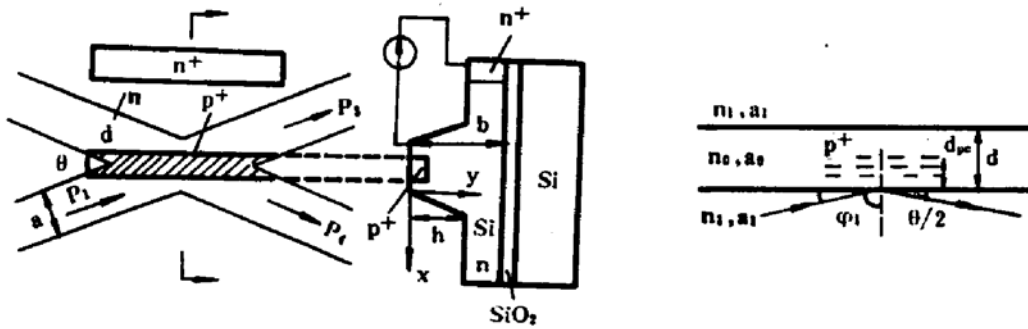


Fig. 1 (a) Schematic view of TIR switch, (b) Schematic view of optical propagation and reflection of (a)

式中  $N_A$  和  $N_D$  分别为注入的平均空穴和电子浓度(单位为  $\text{cm}^{-3}$ ), 且  $N_D = N_A$ ;  $n_1$  为脊形波导芯的折射率,  $a_1$  为相应的吸收系数;  $n_0$  和  $a_0$  分别为空穴和电子注入后, 波导芯内注入区的折射率和吸收系数。因此复数折射率为

$$\tilde{n}_1 = n_1 - i \frac{\lambda a_1 \times 10^{-4}}{4\pi}, \quad \tilde{n}_0 = n_0 - i \frac{\lambda a_0 \times 10^{-4}}{4\pi}; \quad (2)$$

由折射定律:  $\tilde{n}_1 \sin \phi_1 = \tilde{n}_0 \sin \phi_2$  可知, 当  $\phi_1 \geq \theta_c = \sin^{-1}(\tilde{n}_0/\tilde{n}_1)$  时, 全内反射发生, 光从  $P_1$  端反射到  $P_4$  端, 实现光路转换, 由图 1(b)可知, 全反射时

$$\theta/2 = \frac{\pi}{2} - \phi_1 \leq \frac{\pi}{2} - \theta_c = \theta_f/2, \quad (3)$$

这时光强的反射率为 1, 光强的透射率为零。如果反射层介质的厚度  $d$  (见图 1(b)所示)与入射光的波长相当, 则由于光学隧道效应使全反射受抑<sup>[9]</sup>, 变成受抑全反射, 这时反射层介质中的表面消逝波就会隧穿反射层介质, 从图 1(a)所示的  $P_3$  端漏出, 使光开关的串音增大, 器件性能降低。表面消逝波在反射层中的深度  $d_s$  可由 Goos-Hänchen 位移确定<sup>[6]</sup>

$$d_s = \left| \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{(\tilde{n}_1 \cos \theta/2)^2 - \tilde{n}_0^2}} \right|, \quad (4)$$

从理论上讲, 表面消逝波在反射层介质中是按指数衰减的, 因此无论  $d_s$  比  $d$  小多少, 总有一些入射光在全反射发生时, 由于光学隧道效应而从  $P_3$  端漏出, 这实际上是一个分层介质中的波传输问题<sup>[10]</sup>。但只要  $P_3$  端的光功率比  $P_4$  端的光功率小得多, 以至串音小于  $-25 \text{ dB}$ , 那么全内反射开关的性能仍是良好的。定义全内反射开关的开态串音(有载流子注入)CTO、直通端消光比  $E_t$  和反射损耗  $L_r$  分别为

$$CTO = 10 \log_{10} (P_3/P_4) = 10 \log_{10} (T/R), \quad E_t = 10 \log_{10} (1/T), \quad L_r = 10 \log_{10} (1/R), \quad (5)$$

式中  $R$  和  $T$  分别为受抑全反射(而不是全反射)时的光强反射率和光强透射率, 对于 TE 模, 它们分别为<sup>[10]</sup>

$$R = \left| \frac{(\cos^2 \phi_2 \tilde{n}_1^2 - \tilde{n}_0^2 \cos^2 \phi_1) [\exp(-igd) - \exp(igd)]}{(\tilde{n}_1 \cos \phi_2 + \tilde{n}_0 \cos \phi_1)^2 \exp(-igd) - (\tilde{n}_1 \cos \phi_2 - \tilde{n}_0 \cos \phi_1)^2 \exp(igd)} \right|^2, \quad (6)$$

$$T = \left| \frac{4\tilde{n}_1\tilde{n}_0 \cos \phi_1 \cos \phi_2}{(\tilde{n}_1 \cos \phi_2 + \tilde{n}_0 \cos \phi_1)^2 \exp(-igd) - (\tilde{n}_1 \cos \phi_2 - \tilde{n}_0 \cos \phi_1)^2 \exp(igd)} \right|^2; \quad (7)$$

$$g = k \tilde{n}_0 \cos \phi_1,$$

式中  $k$  为真空波数。

以上的分析并没有考虑全内反射光开关·X 结构交叉波导中各分支波导间的模式耦合产生的通道串音。如果 X 型 SOI 交叉波导的各分支波导是单模波导,那么各分支波导间的串音 CTF 在分支角为  $1.25 \sim 2^\circ$  范围内,平均小于  $-25 \text{ dB}^{[11]}$ ,这时交叉波导的传输损耗  $L = 10 \log_{10} [(P_3 + P_4)/P_1]$  平均小于  $-0.35 \text{ dB}^{[11]}$ 。这些结果表明,各通道之间由于模式的耦合作用而导致的串音是很小的,因此这种交叉波导适合做全内反射开关结构,可用上述波动光学中的反射和折射原理来分析 SOI 全内反射光开关的导模传输和反射特性<sup>[7]</sup>。实际上 CTF 就是该开关的关态(无载流子注入)串音。

### 3 数值结果及开关设计

通过数值计算,由(1)式可得反射层折射率的变化  $\Delta n (\Delta n = n_1 - n_0)$  和吸收系数  $a_0$  与注入空穴的平均浓度  $N_A$  的关系,如图 2 所示。从图 2 可知,注入空穴的浓度越大,折射率的改变  $\Delta n$  也越大,但吸收系数也相应增加,不过这个数量级的吸收系数对全内反射开关的性能影响很小。由(3)式可得分支波导的临界分支角  $\theta_c$  与  $N_A$  的关系,如图 3 所示。分支波导的分支角  $\theta$  必须小于这个临界角,以满足全反射条件。由(4)式和(5)式可得全反射表面消逝波透入反射层的深度  $d_r$  和该开关开态串音 CTO 与分支角  $\theta$  的关系,如图 4 所示。从图 4 可知,随着分支角  $\theta$  的增大,开关的 CTO 增大,表面波的透入深度  $d_r$  加深;随着注入空穴的增多,CTO 减小,  $d_r$  减小。由(5)式也可得全内反射开关的直通端消光比  $E_r$  和反射损耗  $L_r$  与分支角  $\theta$  的关系,如图 5 所示。从图 5 可知,随着分支角的增大,消光比减少,反射损耗增大;随着注入空穴的增多,消光比增大,反射损耗减小。

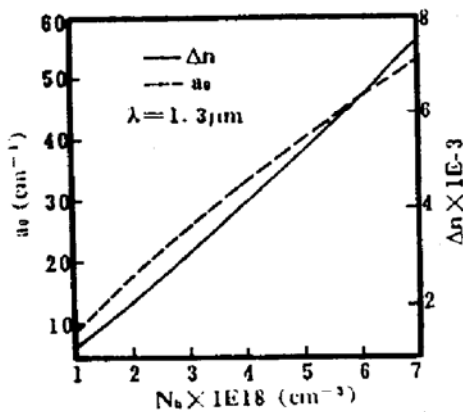


Fig. 2 Refractive index change and absorption coefficient in reflection zone as a function of average concentration of injecting hole

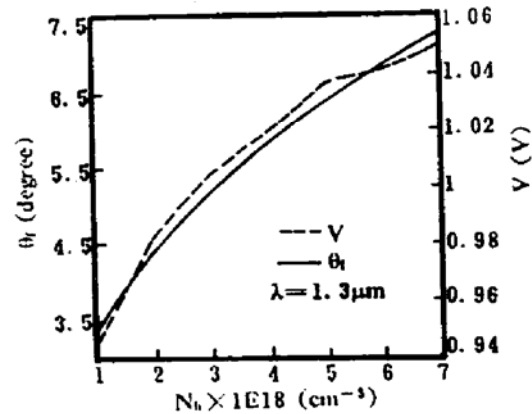


Fig. 3 Critical crossing angle of X waveguide and forward bias voltage applied to p<sup>+</sup>n junction vs average concentration of injecting hole

反射区中注入空穴的浓度取决于 p<sup>+</sup>n 结的  $J-V$  特性。对于图 1(a)所示的 p<sup>+</sup>n 结,当  $x$  方向 n<sup>+</sup> 区与 p<sup>+</sup> 区间的距离不太大时,由于 p<sup>+</sup> 层很薄( $\ll h$ ),因此 p<sup>+</sup>n 结的注入在  $y = 0 \sim h$  范围内可近似为纯  $y$  方向的扩散和漂移。又由于大注入时可使波导芯厚度  $b$  远小于空穴的扩散长度,因此  $y$  方向  $y = 0 \sim b$  范围内注入的载流子分布可近似为线性分布,即

$$N_A(y) = N_A(0)(1 - y/b), \quad (8)$$

式中,在大注入条件下,  $N_A(0)$  满足

$$N_A(0) = n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right), \quad (9)$$

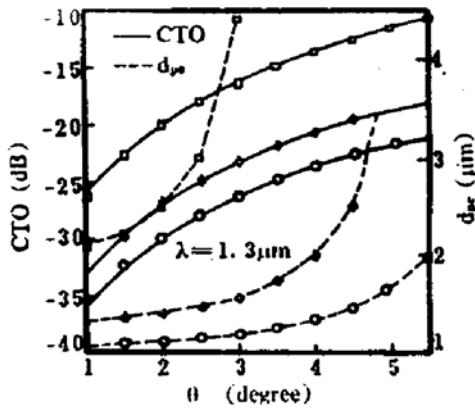


Fig. 4 TIR switch crosstalk and surface wave penetration depth of total reflection as a function of crossing angle  
 -◇-;  $N_b=3E18\text{ (cm}^{-3}\text{)}$ , -○-;  $N_b=5E18\text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ,  
 -□-;  $N_b=1E18\text{ (cm}^{-3}\text{)}$

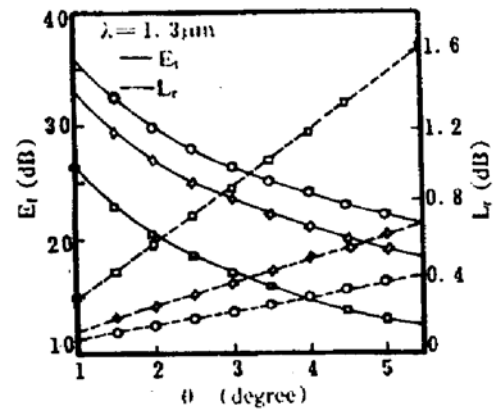


Fig. 5 TIR switch extinction ratio and reflection loss against crossing angle  
 -◇-;  $N_b=3E18\text{ (cm}^{-3}\text{)}$ , -○-;  $N_b=5E18\text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ,  
 -□-;  $N_b=1E18\text{ (cm}^{-3}\text{)}$

它是  $y = 0$  处(结处)注入的空穴浓度, 式中  $V$  为  $p^+n$  结外加正偏压,  $T$  为绝对温度,  $k_0$  为波尔兹曼常数,  $n_i$  为硅本征载流子浓度, 不妨假设在  $y = h$  处,  $N_A = N_A(h)$ , 即

$$N_A = N_A(0)(1 - h/b) = n_i(1 - h/b) \exp(qV/2k_0T), \quad (10)$$

同此可得注入空穴浓度  $N_A$  和外加偏压的关系, 如图 3 所示。另外, 由(10)式可得  $p^+n$  结大注入时的  $J-V$  特性

$$J = 2qD_p n_i / b \exp(qV/2k_0T), \quad (11)$$

式中  $D_p$  为空穴的扩散系数。

根据以上分析, 可对 SOI 材料的全内反射型光波导开关进行设计。由大截面单模脊形波导理论<sup>[12]</sup>可得各分支波导的尺寸, 即  $a = 8\ \mu\text{m}$ ,  $b = 6\ \mu\text{m}$ ,  $h = 2\ \mu\text{m}$  时, 可保证开关各分支波导为单模波导。设计波导芯掺磷浓度  $N_D = 10^{15}/\text{cm}^3$ , 则空穴的扩散系数  $D_p = 10.92\ \text{cm}^2/\text{s}$ , 设计  $p^+$  区的掺硼浓度  $N_A = 5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ , 取注入的空穴浓度  $N_A = 1.86 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ , 则  $N_A = 1.86 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ , 且由(12)式可得  $p^+n$  结外加正偏压  $V = 0.95\ \text{V}$ ; 由(1)式可得反射区吸收系数  $\alpha_0 = 23.30/\text{cm}$ , 折射率的变化  $\Delta n = 3.63 \times 10^{-3}$ 。由(4)式可知表面渗透深度  $d_p = 1.35\ \mu\text{m}$ , 因此注入区的宽度不妨取  $d = 4\ \mu\text{m}$ 。根据(3)式和文献[11], 取分支角  $\theta = 1.5^\circ$ , 这时开关的关态串音 CTF 和传输损耗分别为  $-26.00\ \text{dB}$  和  $-0.35\ \text{dB}$ 。由(3)式至(11)式可得开关的性能参数如表 1 所示。从而 SOI 全内反射开关的所有参数完全确定。

Table 1. The characteristic parameters of the symmetric SOI TIR optical switch

parameters	CTF (dB)	L (dB)	CTO (dB)	$L_r$ (dB)	$E_t$ (dB)	$\theta_f$	$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )
data	-26.00	-0.35	-29.50	0.1869	29.503	$5.22^\circ$	1.3531

**结 论** 本文对对称型全内反射光波导开关的模型进行了重新考虑, 并给出了简单可行的模型。该模型首次考虑了受抑全反射的光学隧道效应, 提出了开关器件的典型结构参数, 并估算了器件的电性能, 其性能参数表明这种材料的全内反射开关是适用的。

## 参 考 文 献

- [1] T. Pirnat, L. Friedman, R. A. Soref, Electro-optic Mode-displacement silicon light modulator. *J. Appl. Phys.*, 1991, 70(6): 3355~3359
- [2] Y. Liu, E. Liu, G. Li, et al., Novel silicon waveguide switch based on total internal reflection. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 64(16): 2079~1080
- [3] 赵策洲, 刘恩科, 李国正, SOI 梯形大截面单模脊形波导的研制. *光学学报*, 1994, 14(7): 783~784
- [4] G. V. Treyz, Silicon Mach-Zehnder waveguide interferometers operating at 1.3  $\mu\text{m}$ . *Electron. Lett.*, 1991, 27(2): 118~120
- [5] S. R. Giguere, L. Friedman, R. A. Soref et al., Simulation studies of silicon electro-optic waveguide devices. *J. Appl. Phys.*, 1990, 68(10): 4964~4970
- [6] K. Shimomura, Y. Suematsu, S. Arai, Analysis of Semiconductor intersectional waveguide optical switch-modulator. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, QE-26(5): 883~892
- [7] 林雯华, 庄婉如, 王德煌, 全内反射型半导体光波导开关器件模型分析. *半导体学报*, 1993, 14(4): 233~241
- [8] 庄婉如, 林雯华, 杨培生等, 载流子注入全内反射型 CaAs/GaAlAs 光波导开关. *半导体学报*, 1993, 14(1): 1~5
- [9] P. K. Tien, Light waves in thin films and integrated optics. *Appl. Opt.*, 1971, 10(11): 2395~2413
- [10] J. M. 布列霍夫斯基赫, 分层介质中的波. 杨训仁译, 北京: 科学出版社, 1960年, 34~43
- [11] 赵策洲, 李国正, 刘恩科, SOI 大截面单模脊形 X 型分支波导的研制. *光学学报*, 1994, 14(11): 1230~1232
- [12] R. A. Soref, J. Schmidtchen, K. Petermann, Large single-mode rib waveguide in GeSi-Si and Si-on-SiO<sub>2</sub>. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, QE-27(8): 1971~1974

## Modeling Study of SOI Optical Waveguide Switch Based on Total Internal Reflection

Zhao Cezhou    Li Guozheng    Liu Yuliang    Liu Enke    Liu Xiding

(Electronic Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(Received 2 October 1994; revised 2 April 1995)

**Abstract** The reflection phenomenon of the guided mode in SOI (Silicon On Insulator) total internal reflection optical waveguide switch is investigated based on optical tunneling effect due to frustrated total reflection and Goos-Hanchen displacement. The p-n junction large injection effect and plasma dispersion effect are discussed, and the electric characteristic of the SOI total internal reflection switch is studied. So, the structural and electric parameters of the switch can be designed.

**Key words** total internal reflection, SOI, mode.