

非对称全内反射型 SOI 波导 开关器件模型分析*

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, 陕西, 西安, 710049)

摘要 根据有效折射率法和光束传播法分析了大截面单模 SOI 脊形 X 型交叉波导的传输特性. 指出交叉角在 $1.5 \sim 2^\circ$ 内, 因导波模式引起耦合作用而导致的串音小于 -25dB ; 采用波动光学原理分析了非对称全内反射开关导模的传输和反射特性; 讨论了等离子体色散效应, pn 结大注入效应以及 Goos-Hänchen 位移, 并分析了非对称全内反射型 SOI 光波导开关的电学性质. 据此优化设计了该器件的结构参数和电学参数.

关键词 全内反射, 交叉波导, SOI, 模型.

引言

近年来, 已在 GaAs/GaAlAs^[1~2] 和硅材料^[3] 上成功地研制出全内反射(TIR)型光波导开关器件. 基于非对称 TIR 型光波导开关的尺寸小, 工艺易实现, 易于与半导体其它无源和有源光电器件集成及大截面 SOI(Silicon-On-Insulator)脊形光波导传输损耗低($<0.85\text{dB/cm}$)等优点^[4~5], 本文根据大截面单模脊形波导理论^[6], 通过有效折射率法^[7](EIM), 把三维矢量光束传播法^[8](BPM)等效成二维标量 BPM^[9], 利用数值计算^[10]分析了交叉波导的传输特性. 根据计算的传输特性, 采用波动光学原理^[10~12], 等离子体色散效应^[13~15]和 Goos-Hänchen 位移分析了非对称 TIR 型光波导开关导模的传输特性并优化了设计.

1 理论分析

X 型交叉波导的各支路截面图如图 1 所示. 为了保证 SOI 交叉波导的单模特性和低耦合损耗及研制中易于控制, 发展了大截面 SOI 单模脊形波导理论^[4,6], 其构成条件如下:

$$\frac{a}{b} \leq 0.3 + \frac{r}{\sqrt{1-r^2}}, \quad r = \frac{b-h}{b}, \quad a \leq 10\mu\text{m}; \quad (1)$$

所谓单模波导的大截面意味着脊外区也可承载基模, 因此可用有效折射率法将实际的三维

* 国家“863”基金资助项目

** 西安电子科技大学微电子所, 陕西, 西安, 710071

*** 中科院半导体所博士后流动站, 北京, 100083

本文 1994 年 12 月 6 日收到, 修改稿 1995 年 4 月 3 日收到

交叉波导等效成二维分支波导. 图 1 所示的脊形波导可等效成二维平面波导, 该平面波导的折射率分布 $N_e(x)$ 如图 2 所示, $N_e(x)$ 可用有效折射率法求得^[7]

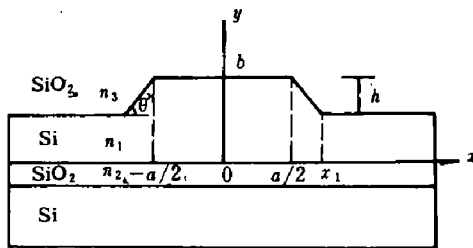


图 1 X 型波导各分支波导截面图
Fig. 1 Cross-sectional view
of each branch waveguide of X type

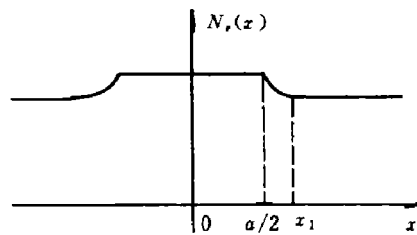


图 2 脊形波导的等效平面波导折射率分布
Fig. 2 Index distribution of effective
planar waveguide of ridge type

半导体器件一般涉及强导性, 需要采用三维矢量 BPM 分析. 但对于 SOI 结构的波导, 单模理论要求 $r \geq 0.5$, 因此在这种情况下, 脊形波导具有小的腐蚀深度 h , 表现出弱导特性. 结合 EIM, 可用二维标量 BPM 来分析 SOI 结构交叉波导. 这种处理方法我们已作了报道^[8], 即根据基于 Crank-Nicolson 格式的有限差分技术, 对二维弱导交叉波导, 可通过求解缓变振幅近似下标量波导方程^[8~10]

$$-2ikn_c \frac{\partial \Psi}{\partial z} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + k^2 [N_e^2(x, z) - n_c^2] \Psi, \quad (2)$$

式中 z 为 BPM 的求解方向, Ψ 为场分布, n_c 为参考折射率, $N_e(x, z)$ 为等效平面波导折射率的分布 (在 X 型交叉波导的非交叉区, $N_e(x, z) = N_e(x)$, 而在交叉区, 因脊形波导的宽度随 z 变化, 故有效折射率 $N_e(x, z)$ 还是 z 的函数); 从而可以得到交叉波导分支角与通道串音和传输损耗的关系 (见图 3 和图 4). 对于具体的器件, 采用基模输入作为式 (2) 的初始条件:

$$\Psi = \Psi_0 \exp[i\beta x \sin(\theta/2)], \quad (3)$$

参考折射率选为^[11]

$$n_c = \beta(\cos(\theta/2)) / k, \quad (4)$$

式 (3) 中, Ψ_0 是由折射率分布 $N_e(x, z=0) = N_e(x)$ 所表述的平面波导的本征模, β 是对应的传播常数, $\theta/2$ 是波导导引方向与 z 轴的夹角, 式 (3) 中的指数项是对不同位置光场的位相校正. 为了获得与实际符合的物理解, 需要给定适当的边界条件. 我们选用了透明边界条件^[12] (TBC). TBC 算法可以和标准的 Crank-Nicolson 有限差分格式相结合, 它所引起的反射系数低达 3×10^{-8} ^[12].

图 3 和图 4 中交叉波导串音 CTF 和传输损耗 L 定义为:

$$\text{CTF} = 10 \log_{10}(p_3/p_4), \quad L = 10 \log_{10}[(p_3 + p_4)/p_1]; \quad (5)$$

式 (5) 中 p_1 、 p_3 和 p_4 分别为输入和输出光场的能量, 计算时取光场振幅的平方.

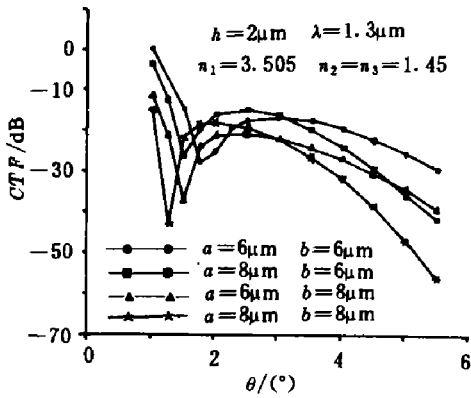


图 3 X 型波导串音与交叉角的关系
Fig 3 X type waveguide crosstalk vs crossing angle

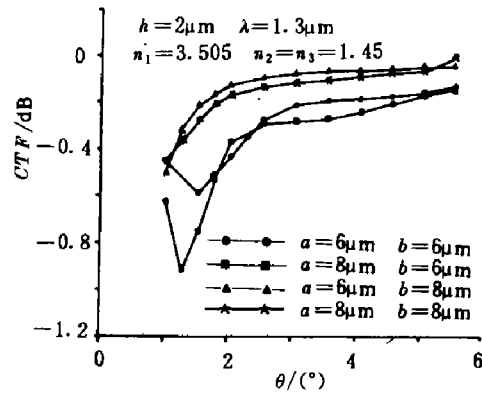


图 4 X 型波导传输损耗与交叉角的关系
Fig 4 X type waveguide propagation loss vs crossing angle

上述理论和程序的可靠性经检验结果是令人满意的,并可以预见,这些分析方法及有些结果对其它材料的半导体交叉波导也是适用的,因为半导体材料的折射率极为接近。

图 3 和图 4 的结果是在长 $2000\mu\text{m}$, 宽 $35\mu\text{m}$ 的求解窗口内得到的. 这些结果表明: 分支角在 $1.5\sim 2^\circ$ 范围内, 通道串音 CTF 有一个最小值(平均小于 -25dB), 这时的传输损耗平均值小于 -0.35dB , 模式发生耦合而导致的串音可以忽略, 因此在这个角度范围内, 可以用波动光学中的反射和折射原理分析^[13~14] SOI 结构 TIR 型光波导开关中的导模传输和反射特性, 而不需再根据波动光学中的 BPM 原理来分析这种 TIR 光开关。

图 5(a)是非对称 SOI 结构 TIR 型光开关, 其交叉区截面图如图 5(b)所示, 光路传输与反射示意图如图 5(c)所示. 由等离子体色散效应可知^[15~17] $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 时, $n_1=3.505$, $a_1=0.1\text{cm}^{-1}$;

$$\left. \begin{aligned} n_0 &= n_1 - 6.0 \times 10^{-18} N_h^{0.8}, \\ a_0 &= a_1 + 2.8 \times 10^{-20} N_h^{1.13}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

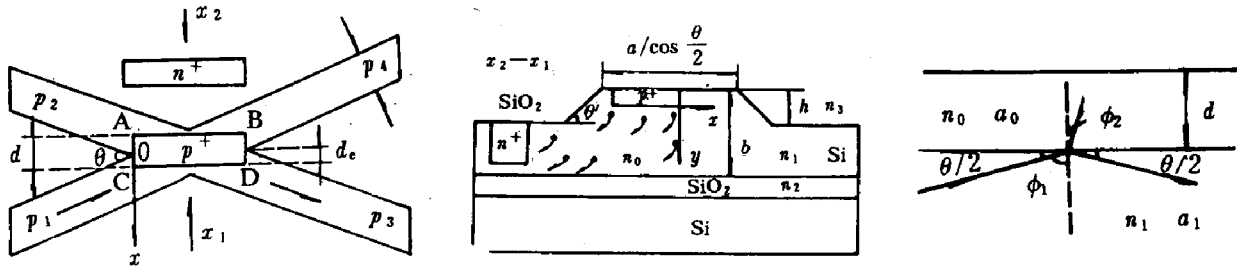
式中 N_h 为注入的平均空穴浓度, 单位为 cm^{-3} ; n_1 为空穴注入前波导芯的折射率, a_1 为相应的吸收系数; n_0 为空穴注入后波导芯内注入区的折射率, a_0 为相应的吸收系数. 因此复折射率 \tilde{n}_1 和 \tilde{n}_0 可以写成如下形式:

$$\tilde{n}_1 = n_1 - i \frac{\lambda a_1 \times 10^{-4}}{4\pi}, \quad \tilde{n}_0 = n_0 - i \frac{\lambda a_0 \times 10^{-4}}{4\pi}; \quad (7)$$

由折射定律可知, 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_3 端, 实现光路转换. 由图 5(c)可知, 全反射时

$$\frac{\theta}{2} = \frac{\pi}{2} - \phi_1 \leq \frac{\pi}{2} - \theta_c, \quad (8)$$

由 Fresnel 公式可得全反射时 TE 模的功率反射率



(a) TIR 波导开关示意图 (b) TIR 波导开关截面图 (c) TIR 波导开关光传输与反射示意图
图 5 TIR 波导开关和它的截面图与反射示意图

Fig. 5 Cross-section view and schematic view of reflection of a TIR switch
(a) TIR switch (b) Cross-section view (c) optical propagation and reflection

$$R = \left| \frac{\tilde{n}_1 \sin \frac{\theta}{2} + i \sqrt{(\tilde{n}_1 \cos \frac{\theta}{2})^2 - \tilde{n}_0^2}}{\tilde{n}_1 \sin \frac{\theta}{2} - i \sqrt{(\tilde{n}_1 \cos \frac{\theta}{2})^2 - \tilde{n}_0^2}} \right|^2, \tag{9}$$

这时,发生 Goos-Hänchen 位移,全反射界面空穴注入区一侧的表面消逝波的消逝长度为^[4]

$$d_{pe} = \left| \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{(\tilde{n}_1 \cos \frac{\theta}{2})^2 - \tilde{n}_0^2}} \right| \tag{10}$$

因此,只要注入区宽度 d (见图 5(a))比 d_{pe} 大得多,则除了波导芯介质吸收一小部分能量外,入射光的能量几乎全部反射,从 p_3 端输出,即 p_4 端没有输出。

发生全反射必须满足式(8),而式(8)由式(6)决定,因此需要讨论 p^+n 结的 $J-V$ 特性。对于图 5(b)所示的 p^+n 结,由于同时存在横向和纵向注入,因此注入机构是一个二维问题。但当 x 方向 n^+ 区与 p^+ 区间的距离不太大时,由于 p^+ 层很薄($\leq h$), p^+n 结在 y 方向 $y=0 \sim h$ 范围内的注入可近似为纯 y 方向的扩散和漂移。当大注入时,空穴的扩散长度远大于 h ,这时载流子的分布在 $y=0 \sim h$ 范围内,可近似为线性分布。考虑到可使波导芯厚度 b 远小于空穴的扩散长度,因此即使在 $y=0 \sim b$ 范围内,注入载流子分布也可近似为线性分布,即对于 p^+n 结,注入的空穴浓度 $N_h(y)$ 为

$$N_h(y) = N_h(0)[1 - (y/b)], \tag{11}$$

式中,在大注入条件下, $y=0$ 处(结处)的空穴浓度 $N_h(0)$ 满足

$$N_h(0) = n_i \exp(qV/2k_0T), \tag{12}$$

其中 V 为 p^+n 结外加正偏压, T 为绝对温度, k_0 为玻尔兹曼常数, n_i 为硅的本征载流子浓度。假设在 $y=h$ 处, $N_h = N_h(h)$,从而有

$$N_h = N_h(0)(1 - h/b), \tag{13}$$

由式(11)可知, p^+n 结大注入时的 $J-V$ 特性为

$$J = \frac{2qD_p n_i}{b} \exp(qV/2k_0T), \quad (14)$$

式中, D_p 为空穴的扩散系数.

2 数值计算结果及 SOI 结构 TIR 型开关的设计

根据式(1),考虑到 $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波长的光纤芯径为 $9 \mu\text{m}$,为了使光纤与 TIR 型开关端面充分耦合,使器件设计具有典型性,取 $a = 9 \mu\text{m}$, $b = 8 \mu\text{m}$,则 $h = 2 \mu\text{m}$,这保证了 TIR 型开关各分支波导为单模波导.波导芯是制作在 SOI 材料的硅膜上的,它通常是低掺杂的,取硅膜的掺杂浓度 $N_D = 10^{15} \text{cm}^{-3}$,这时波导芯中空穴的扩散系数 $D_p = 10.92 \text{cm}^2/\text{s}$,因此由式(12)、(13)和(14)可知,当 p^+n 结外加正偏压为 $V = 0.96 \text{V}$ 时,注入的平均空穴浓度 $N_h = 1.172 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, p^+n 结电流密度 $J = 6.8 \text{kA}/\text{cm}^2$.对于这个正偏压有:(1)由式(6)可知,当波长 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 时,空穴注入区的折射率和吸收系数为: $n_0 = 3.5033$, $a_0 = 7.4284 \text{cm}^{-1}$.(2)由式(8)可知,TIR 型开关的分支角应小于 3.58° ,以便发生全内反射.(3)当 $\theta = 1.5 \sim 2^\circ$ 时,由式(10)可知,对于 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 的光波,Goos-Hänchen 位移 $d_{gc} = 2.08 \sim 2.27 \mu\text{m}$.因此注入区的宽度 d 应是 d_{gc} 的 3 倍以上,考虑到波导尺寸 $a = 9 \mu\text{m}$,取 $d = 6.5 \mu\text{m}$.结合图 5(a),由于 Goos-Hänchen 位移的存在,为了保证全反射的实际反射面尽量在 X 型波导的中心对称面上, p^+ 区的 CD 面应向下($+x$ 方向)偏移一个距离 d_c (而不是正好在 X 型波导对称面 $x = 0$ 上).根据 d_{gc} 的计算值,取这个距离 $d_c = 2 \mu\text{m}$.(4)当 $\theta = 1.5 \sim 2^\circ$ 时,由式(9)可计算出反射系数 R 和反射损耗 $L_r = 10 \log_{10}(1/R)$ 的大小.当 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 时, $R = 0.960 \sim 0.942$, $L_r = 0.177 \sim 0.259 \text{dB}$.反射系数之所以不为 1,是由于反射面两侧的介质存在吸收系数 a_0 和 a_1 .根据上述数值计算结果,可设计出 SOI 结构非对称 TIR 型光开关,其结构和电学等参数见表 1.表 1 中 x_j 为 p^+n 结的结深.

表 1 SOI 结构非对称 TIR 型光波导开关的结构参数和电学参数(举例)

Table 1 The structural and electric parameters of the asymmetric SOI TIR optical switch

参 数	a (μm)	b (μm)	h (μm)	d (μm)	d_c (μm)	x_j (μm)	θ ($^\circ$)	V (V)	J (kA/cm^2)	器件总长 (mm)
数 值	9.0	8.0	2.0	6.5	2.0	0.2	1.5~2	0.96	6.8	5.9

3 结语

本文分析 SOI 结构非对称 TIR 型光波导开关模型,并对该开关的结构参数,电学参数进行了设计.这种结构的开关反射损耗可以小于 0.26dB ,器件的串音小于 -25dB .

致谢 感谢西安电子科技大学安毓英教授和石顺祥教授在全反射理论上给予有益的讨论.

参考文献

- 1 Ito F, Matsuura M, Tanifuji T. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989; **25**(7):1677~1681
- 2 庄婉如, 林雯华, 杨培生, 等. *半导体学报* 1993; **14**(1):1~5
- 3 Liu Y, Liu E, Li G, Zhang S, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1994; **64**(16):2079~2080
- 4 Schmidtchen J, Splett A, Schuppert B, et al. *Electronics Lett.*, 1991; **27**(16):1486~1587
- 5 赵策洲, 刘恩科, 李国正. *光学学报*, 1994; **14**(7):783~784
- 6 Soref R A, Schmidtchen J, Petermann K. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991; **27**(8):1971~1974
- 7 刘育梁, 刘恩科. *光学学报*, 1991, **11**(8):727~732
- 8 刘育梁, 刘恩科, 刘志敏, 罗晋生. *光学学报*, 1994; **14**(3):292~295
- 9 Claberg R, Allmen P V. *Electronics Lett.*, 1991, **27**(8):654~655
- 10 周乐柱. *电子学报*, 1994; **22**(3):77~85
- 11 Yevick D, Rolland C, Szewski W B, et al. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1990; **2**(7):490~492.
- 12 Hadly G R. *IEEE J. Quantum Electron.* 1992, **28**(1):363~370
- 13 Shimomura K, Suematsu Y, Arai S. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(5):883~892
- 14 林雯华, 庄婉如, 王德煌. *半导体学报*, 1993; **14**(4):233~241
- 15 Giguere S R, Friedman L, Soref R A, et al. *J. Appl. Phys.*, 1990; **68**(10):4964~4970
- 16 Pirnat T, Friedman L, Soref R A. *J. Appl. Phys.*, 1991; **70**(6):3355~3359
- 17 Soref R A, Bennett B R. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987; **23**(1):123~129

MODELING ANALYSIS OF ASYMMETRIC 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, Shaanxi, 710049, China)

Abstract Transmission characteristic of X type crossing waveguide structures constructed by a large cross-section single-mode ridge-shaped SOI waveguide was analyzed by using the effective index method and the beam propagation method. When the crossing angle of the crossing waveguides is between 1.5° and 2° , their crosstalks are below -25 dB. The propagation and reflection characteristics of the guided mode in an asymmetric total internal reflection optical waveguide switch were investigated by using the wave optics principle. The plasma dispersion effect, the large injection effect of pn junction and the Goos-Hänchen displacement were discussed and the electric characteristic of the switch was analyzed. The structural and electric parameters of the switch were predicted as well.

Key words total internal reflection, crossing waveguide, SOI, model.

* The project supported by the National High Technology Foundation of China