

# 全硅矩形截面脊形波导的研制 及其损耗分析

赵策洲

(西安电子科技大学微电子所, 西安 710071)

刘恩科 郑玉祥 杨凤丽 李道全 刘志敏

(西安交通大学电子工程系, 西安 710049)

**摘 要** 运用有效折射率法和微分法分别对全硅矩形截面脊形波导的模式特性和模吸收损耗系数作了分析. 通过乙二胺-邻苯二酚水溶液(EPW)各向异性腐蚀的方法, 研制成了矩形截面脊形全硅光波导, 并对其损耗特性进行了研究和讨论.

**关键词** 硅, 脊形波导, 集成光学, 吸收损耗.

## 1 引 言

目前在硅材料上制作波导、分支器以及电光开关, 都是在低阻衬底上外延轻掺杂层后, 通过湿法腐蚀形成导波结构. 要利用这种波导结构作光传输和调制, 就必须对模式特性和模吸收损耗有详细的了解. 迄今为止, 已有一些文献对梯形截面脊形波导的模式特性和模吸收损耗进行了研究<sup>[1,2]</sup>. 然而, 如果能通过湿法腐蚀形成矩形截面的脊形全硅波导, 那么, 它的模式特性和模吸收损耗公式就应该更简单. 为此, 本文对矩形截面脊形波导进行了理论分析, 并研制成了这种硅导波结构.

## 2 矩形截面脊形波导模式特性及模吸收损耗

根据有效折射率法<sup>[3]</sup>, 图1所示的矩形截面脊形波导可演化成x方向的厚度为a, 折射率分布为 $N_2 \cdot N_1$ 、 $N_2$ 的二维对称平板波导的有效折射率. 其中 $N_2$ 为y方向上厚度为b-h、折射率分布为 $n_2$ 、 $n_1$ 、 $n_3$ 的平板波导的有效折射率;  $N_1$ 为y方向厚度为b、折射率分布为 $n_2$ 、 $n_1$ 、 $n_3$ 的平板波导的有效折射率.

$N_1$ 、 $N_2$ 分别满足下述平板波导的TE模方程<sup>[4]</sup>

$$k_0(n_1^2 - N_1^2)^{1/2}b = n\pi + \tan^{-1} \left( \frac{N_1^2 - n_2^2}{n_1^2 - N_1^2} \right)^{1/2} + \tan^{-1} \left( \frac{N_1^2 - n_3^2}{n_1^2 - N_1^2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$k_0(n_1^2 - N_2^2)^{1/2} (b - h) = n\pi + \tan^{-1} \left( \frac{N_2^2 - n_2^2}{n_1^2 - N_2^2} \right)^{1/2} + \tan^{-1} \left( \frac{N_2^2 - n_3^2}{n_1^2 - N_2^2} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中  $n = 0, 1, 2, \dots$  为  $y$  方向模阶数,  $\lambda_0$  为真空中激光波长,  $k_0 = (2\pi/\lambda_0)$  为真空波数. 由等离子色散效应<sup>[5]</sup>可知,  $n^-$ -Si 的折射率  $n_1$  与  $n^+$ -Si 的折射率  $n_2$  之差远小于 1, 当  $b - h$  大于  $\lambda_0/2\pi$  时, 由 (1)、(2) 式可近似解得

$$N_1^2 = n_1^2 - R^2, \quad N_2^2 = n_1^2 - T^2 \quad (3)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{(n+1)\pi}{(n_1^2 - n_2^2)^{-1/2} + (n_1^2 - n_3^2)^{-1/2} + k_0 b} \\ T &= \frac{(n+1)\pi}{(n_1^2 - n_2^2)^{-1/2} + (n_1^2 - n_3^2)^{-1/2} + k_0(b-h)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

原脊形波导  $E_{mn}^x$  模的实有效折射率即为  $x$  方向二维等效平板对称波导 TM 模的有效折射率  $N$ , 可由下述特征方程解出<sup>[4]</sup>.

$$k_0(N_1^2 - N^2)^{1/2} a = m\pi + 2 \tan^{-1} \frac{N_1^2(N^2 - N_2^2)^{1/2}}{N_2^2(N_1^2 - N^2)^{1/2}} \quad (5)$$

式中  $m = 0, 1, 2, \dots$  为  $x$  方向的模阶数.

在  $E_{mn}^x$  模渐趋截止时,  $N \rightarrow N_2$ , 由此可得  $E_{mn}^x$  模的截止方程

$$k_0(N_1^2 - N_2^2)^{1/2} a = m\pi \quad (6)$$

式中  $N_1, N_2$  由 (3)、(4) 式给出. 为了运算方便, 将 (3) 式代入 (5) 式后取隐函数式如下:

$$F(R, T, n_1, N) = k_0 a (n_1^2 - R^2 - N^2) - m\pi - 2 \tan^{-1} \frac{(n_1^2 - R^2)^2 (N^2 - n_1^2 + T^2)^{1/2}}{(n_1^2 - T^2)^2 (n_1^2 - R^2 - N^2)^{1/2}} = 0 \quad (7)$$

考虑介质吸收时,  $n_1, n_2, n_3$  分别用复折射率表示

$$\hat{n}_i = n_i - jk_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (8)$$

式中  $k_i$  分别为第  $i$  层介质的消光系数, 且  $k_i$  为小量. 把 (7) 式推广到复数域, 由 (8) 式可以认为组成波导的介质层的复折射率  $\hat{n}_i$  是在实折射率  $n_i$  的基础上获得虚增量

$$\Delta \hat{n}_i = -jk_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (9)$$

而形成的. 因此由 (4) 式定义的  $R, T$  应分别获得相应的增量  $\Delta R, \Delta T$ , 应用微分法对 (4) 式求微分可得

$$\left. \begin{aligned} \Delta R &= \frac{\partial R}{\partial n_1} \Delta \hat{n}_1 + \frac{\partial R}{\partial n_2} \Delta \hat{n}_2 + \frac{\partial R}{\partial n_3} \Delta \hat{n}_3 \\ \Delta T &= \frac{\partial T}{\partial n_1} \Delta \hat{n}_1 + \frac{\partial T}{\partial n_2} \Delta \hat{n}_2 + \frac{\partial T}{\partial n_3} \Delta \hat{n}_3 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

对 (4) 式求偏导数, 并代入 (10) 式可得

$$\Delta R = -j\Delta R, \quad \Delta T = -j\Delta T \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta R &= \frac{R^2}{(n+1)\pi} \left[ \frac{n_1 k_1 - n_2 k_2}{(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}} + \frac{n_1 k_1 - n_3 k_3}{(n_1^2 - n_3^2)^{3/2}} \right] \\ \Delta T &= \frac{T^2}{(n+1)\pi} \left[ \frac{n_1 k_1 - n_2 k_2}{(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}} + \frac{n_1 k_1 - n_3 k_3}{(n_1^2 - n_3^2)^{3/2}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

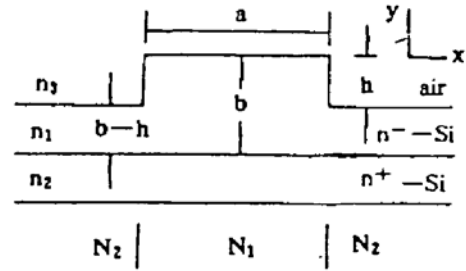


Fig. 1 Cross-section of ridge waveguide and its equivalent slab waveguide

同理, (7)式中的  $N$  应获得相应的增量  $\Delta\hat{N}$ , 对(7)式求微分后可解出

$$\Delta\hat{N} = - \left( \frac{\partial F}{\partial R} \Delta\hat{R} + \frac{\partial F}{\partial T} \Delta\hat{T} + \frac{\partial F}{\partial n_1} \Delta\hat{n}_1 \right) \bigg/ \frac{\partial F}{\partial N} \quad (13)$$

由(9)、(11)式得到

$$\Delta\hat{N} = - j\Delta N \quad (14)$$

$$\Delta N = - \left( \frac{\partial F}{\partial R} + \frac{\partial F}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial F}{\partial n_1} k_1 \right) \bigg/ \frac{\partial F}{\partial N} \quad (15)$$

式中  $\Delta R$ ,  $\Delta T$  由(12)式给出, 四个偏导数可由(7)式求得. 因此, 矩形截面脊形波导  $E_{\infty}$  模的吸收损耗系数  $\alpha$  则为<sup>[2]</sup>

$$\alpha = 2k_0 \Delta N \quad (16)$$

### 3 全硅矩形截面脊形波导的研制

在单晶硅中, 等离子色散效应公式<sup>[5]</sup>可修正为<sup>[7]</sup>

$$\Delta n = - \lambda_0^2 [3.48 \times 10^{-18} (\Delta N_a)^{0.8} + 4.63 \times 10^{-23} (\Delta N_e)^{1.05}] \quad (17)$$

式中  $\Delta N_a$  和  $\Delta N_e$  分别为硅中空穴和电子的浓度,  $\lambda_0$  为波长, 单位为  $\mu\text{m}$ . 在实际应用中, 为了方便起见, 采用线性关系, 误差很小<sup>[8]</sup>. 当  $\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$  时

$$\Delta n = - 6.2 \times 10^{-22} \Delta N_e - 1.2 \times 10^{-21} \Delta N_a \quad (18)$$

因此, 对于  $n$  型硅

$$\Delta n = - 6.2 \times 10^{-22} N_d \quad (19)$$

式中  $N_d$  是电子浓度, 单位为  $\text{cm}^{-3}$ .

在波导制作过程中, 选择重掺杂商业硅片  $n^+$ -Si, 其  $N_d = 4 \sim 6 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ . 在  $n^+$ -Si 上外延生长一层轻掺杂层  $n^-$ -Si, 其  $N_d \approx 10^{16} \text{cm}^{-3}$ . 由于  $\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$  时本征硅的折射率为 3.505, 因此由(19)式可知,  $n^+$ -Si 的折射率  $n_2 = 3.502$ ,  $n^-$ -Si 的折射率为  $n_1 = 3.505$ .

选择波导参数  $h = 2 \mu\text{m}$ , 要求在波导中维持  $E_{\infty}$  模. 据有效折射率法, 脊形波导在  $y$  方向的截止特性实际上就是波导芯厚度为  $b$  的平板波导的截止特性, 对于 TM 模, 可由如下方程确定<sup>[6]</sup>:

$$(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} k_z b = n\pi + \tan^{-1} \frac{n_1^2(n_2^2 - n_3^2)^{1/2}}{n_3^2(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}} \quad (20)$$

因此, 当  $n_3 = 1$  (空气) 时, 维持基模的厚度  $b$  可选为  $6 \mu\text{m}$ . 又由公式(6)可求得脊形波导的宽度  $a$  为  $8 \mu\text{m}$ . 设计波导的长度  $z$  为  $4100 \mu\text{m}$ .

为了便于通过乙二胺-邻苯二酚水溶液(EPW)腐蚀形成矩形截面脊形波导, 单晶硅的晶向选为  $\langle 110 \rangle$ . 因此, 氧化光刻后, 通过乙二胺-邻苯二酚水溶液液相各向异性腐蚀, 再去氧化层, 并对波导的两个端面进行抛光, 可得到图 1 所示的只能维持  $E_{\infty}$  模的矩形截面脊形波导.

### 4 波导损耗及测量

在介质波导中, 导模在传播过程中因吸收、散射和弯曲等原因, 将有功率衰减, 衡量这一性能的参数是衰减系数  $\alpha'$ , 它是光强因损耗而减至原有光强  $1/e$  时传输距离的倒数, 即

$$P = P_0 \exp(-\alpha' z) \text{ 或 } \alpha' = (1/z) \ln(P_0/P)$$

由于模吸收损耗只是总损耗的一部分，下面讨论模吸收损耗系数  $\alpha$  在衰减系数  $\alpha'$  中所占的比重。

#### 4.1 模吸收损耗系数 $\alpha$ 的计算及误差分析

图 1 所示的波导芯上及两侧包层为空气，为非吸收介质，消光系数  $k_3 = 0$ ；下限制层为弱吸收介质  $n^+$ -Si，其体吸收系数<sup>[5]</sup>  $\alpha_2 = 28 \text{ cm}^{-1}$ ，相应的消光系数  $k_2 = \alpha_2/2k_0 = 2.9 \times 10^{-4}$ ；波导芯为轻掺杂层  $n^-$ -Si，其体吸收系数<sup>[9]</sup>  $\alpha_1 = 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ ，相应的消光系数  $k_1 \approx 0$ 。由于波导中只允许传输  $E_{\text{TE}0}$  主模，由(16)式可得  $E_{\text{TE}0}$  模吸收损耗系数约为： $\alpha = 0.21 \text{ cm}^{-1}$ 。因此，从理论上讲，本文设计的全硅矩形截面梯形波导将成为低损耗单模波导。

由于对全硅矩形截面脊形波导的模吸收损耗特性的分析还未见报道，因此，对(16)式可能产生的误差只能进行估计。(16)式是由近似模方程(5)运用微分法而导出的，因此(16)式计算误差由下述两部分误差所决定：一部分是由模方程(5)计算模有效折射率  $N$  产生的误差，另一部分是由微分法计算模吸收损耗系数  $\alpha$  产生的误差。以往的计算表明，在模截止区附近，上述两种误差最大，对梯形波导分别约为  $1.50 \times 10^{-3}$  和  $6 \times 10^{-4}$ <sup>[2]</sup>。由于模方程(5)的近似条件比梯形波导的好，因此由(5)式带来的相对误差应小于  $1.5 \times 10^{-3}$ 。由误差理论可知，(16)式总的最大相对误差就要小于上述两部分误差之和，约为  $2.1 \times 10^{-3}$ ，而且当波导芯厚度  $b$  增大而使模远离截止时，此误差将迅速地减小<sup>[2]</sup>。

#### 4.2 波导损耗的测量及衰减系数 $\alpha'$ 的计算

波导损耗的测量框图如图 2 所示。

光从一端耦合进入脊形波导后，从另一端传播出去，其耦合损耗各为  $1.6 \text{ dB}$ <sup>[9]</sup>。只需测出没有样品时从成像透镜出射的光功率  $P_1$  再测出有样品后从成像透镜出射的光功率  $P_2$ ，以及波导的长度  $z$ ，就可计算出该硅脊形波导的传输功率损耗  $\alpha'$ ，即

$$\alpha' = \frac{10 \lg (P_2/P_1) - 2 \times 1.6}{z} \quad [\text{dB/cm}]$$

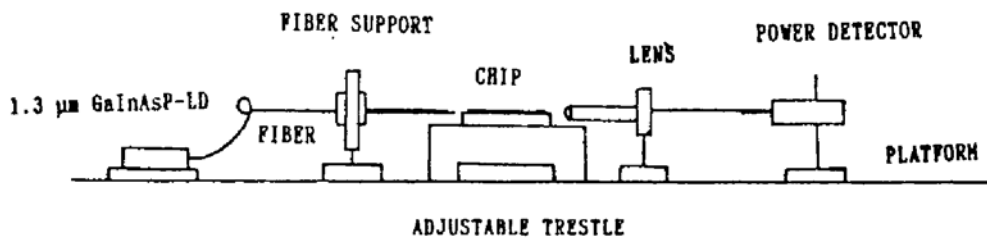


Fig. 2 Loss measurement in all-silicon ridge waveguide

实验测得： $P_1 = 960 \mu\text{W}$ ， $P_2 = 211 \mu\text{W}$ ， $z = 0.41 \text{ cm}$ ，则  $\alpha' = 8.24 \text{ dB/cm} = 1.897 \text{ cm}^{-1}$  ( $1 \text{ cm}^{-1} = 4.343 \text{ dB/cm}$ )， $\alpha' \gg \alpha$ ，即模吸收损耗只是该波导传输损耗中的一个小量，该波导传输损耗主要取决于波导界面的畸变或粗糙引起的散射损耗以及波导体中折射率分布畸变引起的散射损耗。而模吸收损耗只是体损耗中由带间跃迁及自由载流子吸收引起的损耗。对于本文所设计的硅波导，由于选择的传输光波波长  $\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$ ，因此模吸收损耗只是导带内电子吸收引起的损耗。

因此，要减小全硅矩形截面脊形波导的传输损耗，主要是要减小它的散射损耗，应从工艺控制和加工精度方面着手。

**结 论** 可以通过乙二胺-邻苯二酚水溶液相各向异性腐蚀法, 在硅〈110〉晶向上得到矩形截面脊形波导. 通过对该脊形波导模式特性的分析, 研制成了只能维持基模的单模波导. 通过对模吸收损耗系数的分析和对该波导损耗特性的测量, 指出了模吸收损耗只是该波导传输损耗中的一个小量, 该波导传输损耗主要来源于散射.

### 参 考 文 献

- [1] 刘育梁, 刘恩科, 梯形截面硅脊形波导的模式特性及其等离子色散效应. *光学学报*, 1991, 11(8): 727~732
- [2] 马春生, 刘式墉, 梯形截面介质波导的模吸收损耗. *光学学报*, 1992, 12(3): 247~259
- [3] T. Tamir, *Integrated optics*, Second corrected and updated edition. New York: Springer-Verlag, 1979: 62~66
- [4] M. S. Sodha, A. K. Ghatak, *Inhomogeneous optical waveguides*, New York: Plenum Press, 1977: 24~29
- [5] Richard A. Soref, B. R. Bennett, Electrooptical effects in silicon. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, QE-23(1): 123~129
- [6] 金 峰, 范俊清, 集成光学(上册), 北京: 国防工业出版社, 1981: 24~25
- [7] Y. Hibino, Neodymium-doped silica optical waveguide laser on silicon. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1989, 1(11): 349~350
- [8] Linonel Friedman, Richard A. Soref, Joseph P. Lorenzo, Silicon double-injection electro-optical modulator with junction gate control. *J. Appl. Phys.*, 1988, 63(6): 1831~1839
- [9] Richard A. Soref, Joseph P. Lorenzo, All-silicon active and passive guided-wave components for  $\lambda=1.3$  and  $1.6 \mu\text{m}$ . *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, QE-22(6): 873~879

## Fabrication of All-Silicon Ridge Waveguide with Rectangular Cross-Section and Its Loss Analysis

Zhao Cezhou

(Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071)

Liu Enke      Zheng Yuxiang      Yang Fenli      Li Daoquan      Liu Zhimin

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

(Received 3 August 1993; revised 23 November 1993)

**Abstract** Based on the effective index method and the differentiation method, modes characteristic and modes absorption loss coefficient of all silicon ridge waveguide with rectangular cross-section are analysed. By using anisotropic etching with Ethylenediamine-Pyrocatechol-Water Solution (EPW), all-silicon ridge waveguides with rectangular cross-section have been fabricated, and its loss characteristics have been discussed and analysed.

**Key words** silicon, ridge waveguide, integrated optics, absorption loss.