

一种低损耗 SiGe 脊形光波导的结构和设计*

施 斌 蒋最敏 王 迅

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室 上海 200433)

摘要 本文提出了一种 Ge 含量在波导厚度方向渐变的 SiGe 光波导, 对这种波导进行了模式分析, 给出了进行单模波导设计的方法, 并与成分均匀的 SiGe 光波导进行了传输损耗的比较, 发现这种波导具有更小的传输损耗

PACC: 4280L

1 引言

SiGe 脊形波导作为全硅基光电集成最基本的部分, 其特性对整个光路的特性有着重要影响, 而它的传输损耗则是影响其特性的一个基本参数。所以降低 SiGe 脊形波导的传输损耗, 对于提高整个集成光路的性能就显得相当重要。在 90 年代初, So-ref 等人制作出了工作在 $1.3\mu\text{m}$ 波长时传输损耗 $1.9\text{dB}/\text{cm}$ (TM 模) 和 $3.2\text{dB}/\text{cm}$ (TE 模) 的接近实用价值的 SiGe 光波导^[1]。之后 Pesarcik 等人又完成了损耗为 $0.62\text{dB}/\text{cm}$ (TM 模) 和 $0.50\text{dB}/\text{cm}$ (TE 模) 的波导^[2]。但在此之后, 进一步降低损耗的工作出现了停顿。

对于现在的低损耗 SiGe 光波导 ($0.5\text{dB}/\text{cm}$ 左右) 而言, 其传输损耗主要由导波层 (芯层) 与衬底之间界面的界面散射引起, 而要通过改善界面的方法来减少这种散射, 在工艺尚未取得突破以前已很难有较大的进展。从另一角度考虑, 如果将光场尽量约束在远离界面的区域的方法, 也能减少界面散射的影响从而降低传输损耗。由此, 本文提出用折射率呈三角形分布的渐变折射率 SiGe 光波导来实现这种约束, 并对这种形式的波导作了模式分析和参数设计, 其传输损耗与均匀型波导作了比较。

2 波导的结构

SiGe 合金的折射率随 Ge 组分的增大而增大, 因而, 当 Ge 的组分在波导厚度 h 的范围连续变化时, 折射率也随之连续变化。如果我们使 Ge 的组分呈沿厚度方向中间高两边低的分布, 相应的, 折射率的分布也是中心高, 两边低, 那么就有可能使在其中传播的光被限制在中心附近。从线光学的角度看, 此时光将沿一种连续的“弧形光线轨迹”传播, 如图 1 中的类

* 国家自然科学基金重点资助项目

施 斌 男, 1975 年出生, 硕士研究生, 目前的主要研究方向为 Si 基光电子集成
1998-05-09 收到, 1998-06-28 定稿

正弦曲线所示, 而不是象折射率均匀波导中沿折线方式传播 从图 1 可以看到在折射率渐变的波导中光线被限制在中心附近, 从而离开了散射损耗较大的边界区域

基于以上思想, 我们提出了以下的 SiGe 光波导结构 在硅衬底上外延生长一层 Ge 组分沿厚度方向为对称三角形分布的 SiGe 合金层, 再在外延层上刻蚀出脊形波导结构, 其具体结构如图 2 所示 在图中, h 为内

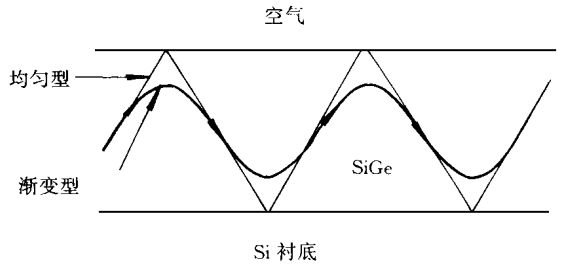


图 1 光在渐变型 SiGe 波导中的传播径迹示意图

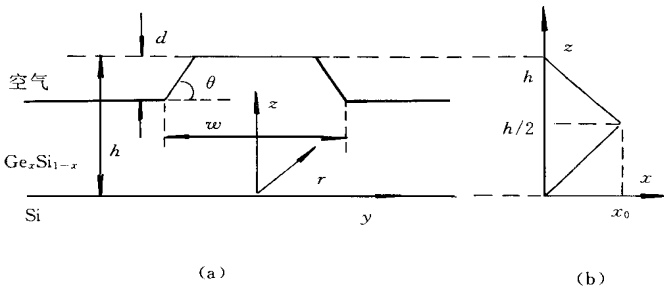


图 2 渐变型 SiGe 脊形光波导的 (a) 结构示意图和 (b) Ge 浓度在厚度方向分布图

脊高, d 为刻蚀深度, w 为脊宽, x_0 为 Ge 峰值浓度, θ 为脊内侧倾角 与通常的 SiGe 脊形光波导不同的是, 此时在 SiGe 合金层中 Ge 的组分不再是恒定的, 而是随高度 z 变化, Ge 浓度的分布为 $x(z) = x_0 \left[1 - \left| \frac{2z}{h} - 1 \right| \right]$. 在完全应变的情况下, SiGe 合金的折射率与 Ge 浓度 x 的关系为 $\tilde{n} = \tilde{n}_0 + 0.18x^{[1]}$, 这

里 \tilde{n}_0 是 Si 的折射率, 因而此时的折射率分布为

$$\tilde{n}(z) = \tilde{n}_{Si} + 0.18x_0 \left[1 - \left| \frac{2z}{h} - 1 \right| \right] \tag{1}$$

3 波导的模式分析

对于这种形式的波导, 要用解析的方法进行严格的模式分析是不可能的, 因而这里我们通过分层逼近并利用有效折射率法近似地加以数值分析 我们对波导的梯形截面作如图 3 所示分割 分割的方法是先沿波导脊宽方向将它分割成若干垂直的列, 每个分割单元中高度相对变化率不大于精度要求; 再对每一列沿波导脊高方向 z 进行分割, 每个分割单元中折射率的相对变化率不大于精度要求 我们认为在分割出的每个网格单元中, 其折射率是均匀的

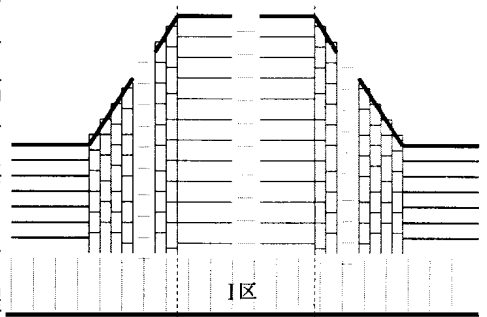


图 3 波导梯形截面网格划分示意图

在划分出的网格中, 先将每一列作为脊高方向上的多层平板波导进行模式分析 在分析过程中, 对 E^y 模, 应作 TE 模的模式分析, 而 E^x 模则应作 TM 模的分析 对多层平板波导的分析, 我们采用由多层薄膜的传输矩阵得到模式本征方程:

$$\frac{\zeta k_0}{\gamma_1} A_k - B_k - \frac{\zeta \zeta k_0^2}{\gamma_1 \gamma_k} C_k + \frac{k_0 \zeta}{\gamma_k} D_k = 0 \quad (2)$$

其中 k_0 为光在真空中的波矢; 系数 A_n, B_n, C_n, D_n 由多层传输矩阵定义

$$\begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix} = \prod_{i=k-1}^2 F_i(d_i) \quad (3)$$

$F_i(d_i)$ 和 γ_i, ζ_i 定义为:

当 $\tilde{n}_i > N_m$ 时,

$$F_i(d_i) = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i d_i & -\frac{k_0 \zeta_i}{\gamma_i} \sin \gamma_i d_i \\ \frac{\gamma_i}{k_0 \zeta_i} \sin \gamma_i d_i & \cos \gamma_i d_i \end{bmatrix}, \quad \gamma_i = k_0 \sqrt{\tilde{n}_i^2 - N_m^2} \quad (4)$$

当 $\tilde{n}_i < N_m$ 时,

$$F_i(d_i) = \begin{bmatrix} \cosh \gamma_i d_i & -\frac{k_0 \zeta_i}{\gamma_i} \sinh \gamma_i d_i \\ -\frac{\gamma_i}{k_0 \zeta_i} \sinh \gamma_i d_i & \cosh \gamma_i d_i \end{bmatrix}, \quad \gamma_i = k_0 \sqrt{N_m^2 - \tilde{n}_i^2} \quad (5)$$

ζ 的定义为对于 TE 模, $\zeta = 1$; 对于 TM 模, $\zeta = \tilde{n}_i^2$, \tilde{n}_i 为每层中的折射率, d_i 为每层的层厚, N_m 为 m 阶模的模折射率

以上各式给出了关于模折射率 N_m 的模式本征方程, 再用搜零的方式由计算机求解上述模式本征方程, 得到各模对应的模折射率 N_m . 在搜零过程中, 采用由 Ruschin 等人提出^[3], 由 Li 和 Lit 进一步发展的模计数法则^[4]进行控制. 在得到了模折射率 N_m 之后, 将此模折射率作为这一列的有效折射率, 再将每列看作一层, 作脊宽方向上的多层平板波导分析, 分析的方法与前面相同, 只是对 E^y 模应作 TM 模的模式分析, 而 E^x 模应作 TE 模的模式分析, 就可以得到整个波导的模折射率 N_{mn} (m, n 分别为脊高和脊宽方向模的阶数). 由模折射率就可以得到模传播常数 $\beta = N_{mn} k_0$ 和相应的有效数值孔径 $NA = \sqrt{\tilde{n}_{\max}^2 - N_{mn}^2}$ (\tilde{n}_{\max} 为波导中心处的折射率) 等重要参数

图 4(a) 和 (b) 是 $1.3 \mu\text{m}$ 波长时不同厚度、不同 Ge 峰值浓度下脊高方向内脊部分单列平板波导 (图 3 中 I 区) 最低阶的两个 TE 模和 TM 模的模折射率, 每根曲线对应于特定内脊高 h 时一个模式的模折射率随 Ge 峰值浓度的变化, 若在某一个高 h 时对某一 Ge 峰值浓度有两个模折射率, 则此时波导工作在多模区, 若只能找到一个, 则为单模工作, 若一个都找不到, 则为截止区. 例如在 $x_0 = 8\%$, $h = 3 \mu\text{m}$, 则从图 4(a) 中看到有两个对应的 TE 模, 而 $h = 2.5 \mu\text{m}$ 时则只有一个 TE 模. 从图中可以看到不管是 TE 模还是 TM 模在 $1.5 \sim 4 \mu\text{m}$ 都存在一个单模区域, 因而可选这一区域做成单模波导. 同时, 同一高度下 TM 一阶模截止时对应的峰值浓度 x_0 低于 TE 一阶模截止时的浓度, 因而也可用作 TE 模式滤波器. 图 5 是在内脊高 $h = 2 \mu\text{m}$, Ge 峰值浓度 $x_0 = 7\%$ 时不同脊宽时模折射率随刻蚀深度 d 的变化图, 其单模区、多模区的判别方法和前面的类似, 若一个宽 w 和刻蚀深度 h 只有一个模折射率与之对应, 则为单模工作, 若有两个则为多模工作.

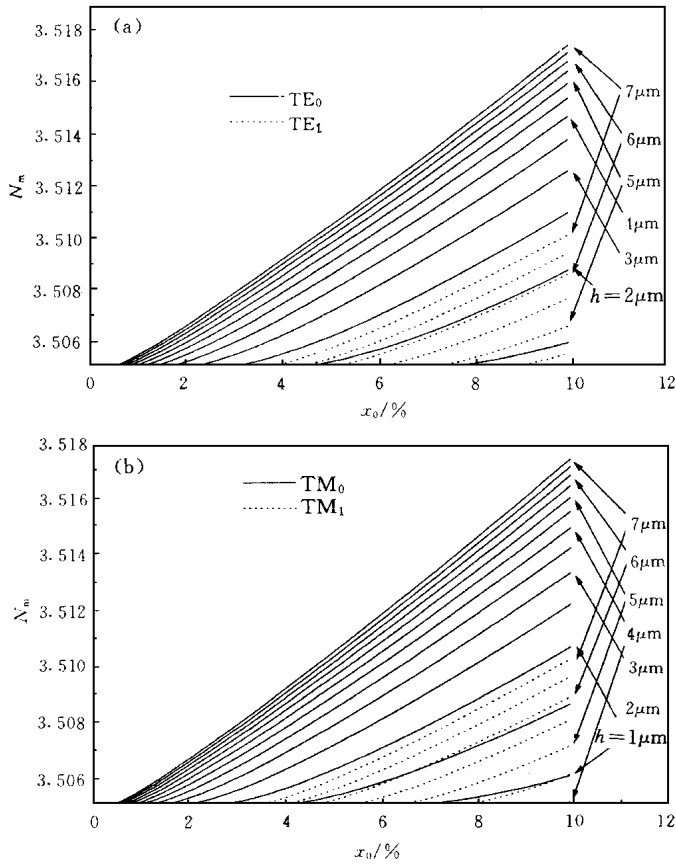


图 4 渐变型波导中不同脊高时模折射率随 Ge 峰值浓度变化图
(a) TE 模, (b) TM 模

4 波导参数的设计

为了使这种形式的波导有良好的单模特性, 并与单模光纤耦合良好, 我们需要选择一组适当的结构参数和 Ge 峰值浓度。从图 2 我们可以看到一共有五个参数待定, 分别为内脊高 h 、脊宽 w 、刻蚀深度 d 、Ge 峰值浓度 x_0 及脊内侧倾角 θ 。但脊内侧倾角 θ 在刻蚀条件一定时已经确定, 因而可选择的参数只有四个。其中 h 和 x_0 主要对波导的

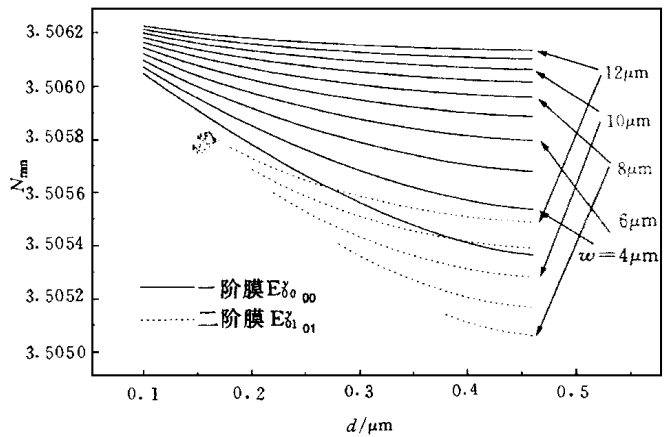


图 5 渐变型波导中不同脊宽时 E^y 模折射率随刻蚀深度变化图

脊高方向的单模特性产生影响, 二者还受到 SiGe 应变层临界厚度的限制。用 Ge 的平均组分通过均匀 SiGe 合金的临界厚度的数据可知, 图 4 中所列厚度在单模区均小于临界厚度,

因而可保持完全应变 w 和 d 则主要对脊宽方向的单模特性产生影响, h 和 w 还决定了波导截面是否与光纤匹配, 而这四者共同决定的波导有效数值孔径 NA 也应与光纤匹配 因而在设计时, 主要应依以上几个方面来进行设计.

具体的设计步骤为: 先由光纤截面的匹配要求初步确定 h 和 w ; 再根据脊高方向的单模要求, 利用图 4 得到在所选高度 h 下只存在一阶导模的 Ge 峰值浓度的范围, 初步选定一个 x_0 ; 然后在已定 h 和 x_0 的情况下作类似图 5 的模折射率图, 并由图得已选的 w 下只存在一阶导模的区域, 而根据单模光纤的数值孔径的匹配要求, 以及已定的 x_0 , 由数值孔径定义 $NA = \tilde{n}_{\max} \sin \phi$ 又 $\cos \phi = N_{mn} / \tilde{n}_{\max}$, 则可确定模折射率 $N_{mn} = (\tilde{n}_{\text{Si}} + 0.18x_0) \cos \frac{NA}{\tilde{n}_{\text{Si}} + 0.18x_0}$. 若此模折射率在单模区域, 则由图读出此时的刻蚀深度 d , 则已选 h, x_0, w, d 即为一组合适的参数; 若不在单模区, 则可在 x_0 的单模范围内稍调整 x_0 , 原则是若模折射率在单模区较大一方, 则减小 x_0 , 反之则增大 x_0 , 并重复以上步骤, 一直到找到一组参数满足模折射率在单模区域的条件为止. 一般数值孔径在 0.2 至 0.3 之间时, 总能找到一组合适的参数. 若始终未找到一组合适的参数, 可调整 w . 原则是若模折射率在单模区较大一方, 则调大 w , 反之减小 w , 直到找到一组合适的参数为止, 至此设计工作便完成了.

以下是一个设计的实例, 由光纤截面要求, 我们选择 $h = 2.0 \mu\text{m}$, $w = 8.0 \mu\text{m}$. 接着在图 4 中选取单模区域, 初步确定 $x_0 = 7\%$, 再作 $h = 2.0 \mu\text{m}$, $x_0 = 7\%$ 时不同脊宽下模折射率随刻蚀深度变化图, 选取 $d = 0.2 \mu\text{m}$ 时恰好处于单模区域, 模折射率为 3.506, 相应的数值孔径 $NA = 0.28$, 因而这组参数满足要求, 此时的模传播常数为 $\beta = 1.695 \times 10^7 \text{m}^{-1}$.

5 波导的传输损耗特性

我们认为在 SiGe 光波导中导致传输损耗的主要原因是界面缺陷散射, 而这种散射引起的损耗与界面处的光强成正比. 为了比较渐变型 SiGe 光波导与均匀型 SiGe 光波导由这一原因导致的损耗, 我们分别计算这两种波导的场强分布. 由于这两种波导主要的区别在脊高方向, 界面散射也主要集中在内脊部分(即图 3 所示 I 区), 因而可近似的用与内脊部分结构相同的平板波导来作比较. 分别对这两种平板波导进行场分布的计算, 并由通过波导截面的能流作归一化, 就可分别求出两种波导在界面处的光强. 在这里我们利用(3)式所得传播系数矩阵, 由下式^[3]

$$\begin{bmatrix} \Phi_y \\ \Phi_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{y0} \\ \Phi_{x0} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\Phi_z = \frac{\beta}{\epsilon_{k0}} \Phi_y \quad (7)$$

其中 $\Phi_y = \begin{Bmatrix} E_y \\ \mathcal{H}_y \end{Bmatrix}$, $\Phi_x = \begin{Bmatrix} j\mathcal{H}_r \\ -j\mathcal{H}_l \end{Bmatrix}$, $\Phi_z = \begin{Bmatrix} -\mathcal{H}_z \\ E_z \end{Bmatrix}$, 对 TE 取上段, 对 TM 取下段即可求得两者在波导中的场强分布, 分别对其作截面所在平面的全平面坡印廷矢量 r 方向的积分归一化, 归一化中衬底中的场 $\Phi = \Phi \exp(\gamma_l z)$, 包层中 $\Phi = \Phi \exp(-\gamma_k z)$. 取上面给出的例子中的参数, 高为 $3.0 \mu\text{m}$, Ge 峰值浓度为 7% 的渐变型波导, 并取具有相同传播常数的均匀波导, 其 Ge 浓度为 3.5%, 则前者与后者的 TE 模与 TM 模的能量强度分布如图 6. 从图中我们可

以看到, 渐变型 SiGe 光波导具有比均匀型光波导更小的界面光强, 因而受界面散射的影响较小, 具有更小的界面传输损耗. 若只从界面处的光强来初步估算, 则渐变形光波导将比均匀形波导的损耗减小 40%.

6 结论

以上我们讨论了渐变型 SiGe 光波导的结构, 并对这种形式的光波导进行了模式分析, 给出了参数设计的方法. 通过与均匀型波导的界面处场强分布的比较, 这种形式的光波导受到的界面散射影响较小, 具有更小的传输损耗, 因而采用这种形式, 有望得到性能优良的低损耗硅基光波导.

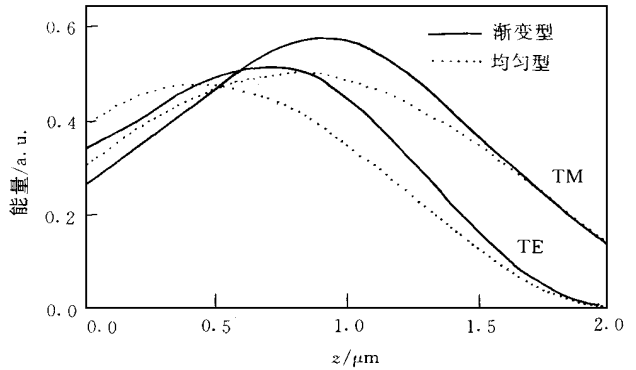


图 6 波导中的 TE 模与 TM 模的场强分布图

这种形式的光波导受到的界面散射影响较小, 具有更小的传输损耗, 因而采用这种形式, 有望得到性能优良的低损耗硅基光波导.

参 考 文 献

- [1] R. A. Soref, F. Namavar and J. P. Lorenzo, *Opt Lett*, 1990, **15**(5): 270~ 272
- [2] S. F. Pesarcik, G. V. Treyz, S. S. Iyer *et al*, *Electron Lett*, 1992, **28**(2): 159~ 160
- [3] S. Ruschin, G. Griffel, A. Hardy *et al*, *J. Opt Soc Amer A.*, 1986, **3**(1): 116~ 123
- [4] Y. F. Li and J. W. Y. Li, *J. Opt Soc Amer A.*, 1987, **4**(12): 2233~ 2239

Structure and Design of New Low Loss SiGe Optical Waveguide

Shi Bin, Jiang Zu min, Wang Xun

(*Surface Physics Laboratory, (National Key Laboratory) Fudan University, Shanghai 200433*)

Received 9 May 1998, revised manuscript received 28 June 1998

Abstract A new structure of SiGe optical waveguide has been suggested, in which the germanium content in the SiGe alloy layer is not uniform but changes gradually with the height in the SiGe epitaxial layer. The method to analyze and design the waveguide of such structure has been discussed. We also study the difference of the propagation loss between the uniform germanium content waveguide and the gradual one, finding that the later structure has a lower propagation loss.

PACC: 4280L