

锗硅合金脊形光波导的优化分析与设计*

高勇** 李国正 刘恩科 刘西钉

(西安交通大学电子工程系, 西安 710049)

摘 要 根据脊形光波导的基本设计要求, 分析了锗硅合金脊形波导的结构参数对其光传播特性的影响, 并优化设计了结构参数, 其合理性得到了实验验证。

关键词 锗硅合金, 脊形光波导。

1 引 言

由于硅在光通信的主要波段($\lambda = 1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$)的透明性和等离子色散效应^[1]的发现, 硅的光集成愈来愈引起人们的关注。光集成的基本连接方式是通过光波导来实现的。在硅光集成技术中最常见的是脊形光波导。1986年, Soref^[2]首次报道了采用在低阻 Si 衬底上外延生长高阻层的方法制成 n/n^+ 或 p/p^+ 结构的脊形波导。这种波导由于 n^+ 或 p^+ 层高载流子浓度的光吸收, 传输损耗一般大于十几个 dB/cm。接着有人采用 SOI(Silicon-On-Insulator)方法将光波导层与低阻衬底用 SiO_2 隔开, 排除了衬底载流子引起的吸收损耗, 使传播损耗趋近于实用值^[3]。它的缺点是作为上下覆盖层的 SiO_2 和空气的折射率与波导层 Si 的折射率相差较远, 使之数值孔径过大, 不易与单模光纤高效耦合。因此从九十年代初人们开始对 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 材料用来制作 SiGe/Si 和 Si/SiGe/Si 结构的光波导和其它光集成器件产生了极大的兴趣, 相继报道了一些初步研究结构^[4,5]。本文根据硅光集成技术对脊形光波导的基本要求, 系统分析了 SiGe/Si 脊形波导的结构参数对其光传播特性的影响, 设计结构参数的合理性得到了验证, 为 SiGe/Si 脊形波导的优化设计提供了很好的依据。

2 理论分析

为了实用化, 在脊形光波导设计中需要满足以下几个原则: 1) 波导承载单模; 2) 小于 1 dB/cm 的传播损耗; 3) 波导最好是大截面, 尽可能与单模光纤的芯径相当; 4) 光波导的数值孔径要接近单模光纤的数值孔径。硅的折射率为 3.5, 锗的折射率为 4.3。锗硅合金材料的折射率可通过锗含量来调节。因此用锗硅合金制作波导, 通过调节锗含量很容易使其数值孔径满足要求。同时作为波导层的 SiGe 合金是生长在高阻的硅衬底上, 可避免高载流子浓度引起

* 国家自然科学基金资助课题。

** 现通讯地址: 西安理工大学微电子教研室, 西安 710048。

收稿日期: 1994年12月29日; 收到修改稿日期: 1995年2月21日

的吸收损耗。所以 SiGe 合金是目前硅光集成技术中制作光波导及其它光集成器件的最佳材料选择。然而,用 SiGe 合金制作光波导要完全满足上述几个原则,还需在设计中考虑以下几个因素的影响。

2.1 Ge 含量对光波导大截面要求和传输损耗的影响

众所周知,Ge 含量 x 是与 SiGe 合金的晶格常数有关的参数。若 x 从 0 ~ 1 变化,其晶格常数则相应地在 5.431 ~ 5.646 间变动。只要 $x \neq 0$, SiGe 合金与其 Si 衬底就有晶格失配,就会导致应力的产生。在异质结外延中,这种应力将随着外延层(SiGe 合金层)的厚度的增加而变大。当厚度超过某一临界值时,将产生大量失配位错,严重破坏材料的物理性质。在 SiGe/Si 或 Si/SiGe/Si 波导的设计中同样不可避免这个问题。临界厚度的限制会对光波导的大截面要求受到影响。

根据 Ge 含量与失配临界厚度的关系^[6],当 x 较大时,临界厚度值很小。若这时光波导的 SiGe 合金层厚度限制在失配临界厚度值内,则远远不能满足大截面要求,无法与光纤尺寸匹配。这样会使光集成片的输入输出端不能和单模光纤高效耦合。若光波导的 SiGe 合金层厚度远大于失配临界厚度。电镜分析会发现:SiGe 层与 Si 衬底之间的界面变得非常粗糙,而且整个外延层(SiGe 层)都存在大量的缺陷和位错。从波导的光传播特性角度看,会产生很大的由失配缺陷和位错引起的散射损耗。对光波导的低损耗要求极为不利。图 1 是 SiGe 合金中锗含量 x 与失配临界厚度的关系曲线。从图易看出:若 Ge 含量选取适当(小于 0.05),临界厚度值上升很快,这时选择小于临界厚度的值作为波导层(SiGe 层)的厚度完全可满足光波导与光纤相匹配的大截面要求。

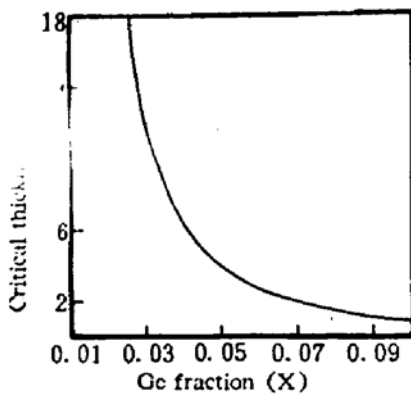


Fig. 1 SiGe layer critical thickness vs Ge content x

Ge 含量对 SiGe 脊形光波导传输损耗的影响,除上述的 Ge 含量过大而 SiGe 层厚度大于临界厚度时会产生很大的散射损耗外,还有一个辐射损耗问题,Ge 含量不一定愈小愈好。如果 Ge 含量减小得过多会使外延层和衬底的折射率差变小,波导层对模式特别是高阶模的限制度差,引起辐射损耗增大。由此可见要设计出既满足与光纤相匹配的大截面要求,又能保证传输损耗低的光波导, SiGe 合金的锗含量选择有一个优化问题。首先选择适当的 x 使作为光波导层的 SiGe 层厚度不能超过失配临界厚度(避免散射损耗);同时又能满足光波导的大截面要求。由图 1 可知应选取 $x \leq 0.05$ 。其次,Ge 含量 x 的选择使其满足大截面要求后不宜再减小太多,否则会导致

辐射损耗增大。所以作者认为 SiGe 层中 Ge 含量的选择范围在 $0.02 \leq x \leq 0.05$ 为宜。

2.2 脊形光波导结构参数对光传播单模性的影响

图 2 是 SiGe/Si 脊形波导的截面示意图。图中注明了设计中需要确定的几何结构参数。前面已提及这些几何参数(主要指 d 和 W)要尽可能与光纤尺寸匹配,即满足大截面条件。这只是问题的一方面。在这些参数的选取中还需考虑是否满足波导承载单模的要求。这是脊形光波导设计中一个非常重要的问题。需要由光波导的模截止方程来确定。

首先考虑 SiGe 层厚度 d 的选取。根据有效折射率法,脊形波导在 y 方向的模截止特性可用以下厚度为 d 的平板波导截止方程来确定:

$$(n_f^2 - n_s^2)^{1/2} k_0 d = \nu\pi + \tan^{-1} \sqrt{a'} \quad (1)$$

其中 ν 是模数, 对于 TE 模,

$$a'_{TE} = (n_s^2 - n_c^2)/(n_f^2 - n_s^2) \quad (2)$$

对于 TM 模,

$$a'_{TM} = (n_f/n_c)^4 [(n_s^2 - n_c^2)/(n_f^2 - n_s^2)] \quad (3)$$

SiGe/Si 脊形波导的特点是波导芯的折射率 n_f 可通过 SiGe 外延层的 Ge 含量来调节。因此 SiGe/Si 光波导的模截止特性应与 Ge 含量联系起来。根据 Soref 的红移模型^[4], 当 $x < 0.2$ 时, 由 Ge 含量引起的折射率变化 Δn_c 可由下式表示:

$$\Delta n_c = 0.09 x \quad (\text{对于无应变材料}) \quad (4)$$

$$\Delta n_c = 0.18 x \quad (\text{对于应变材料}) \quad (5)$$

综合(1)~(5)式可得 SiGe/Si 脊形波导在 y 方向的模截止特性曲线, 如图 3 所示。

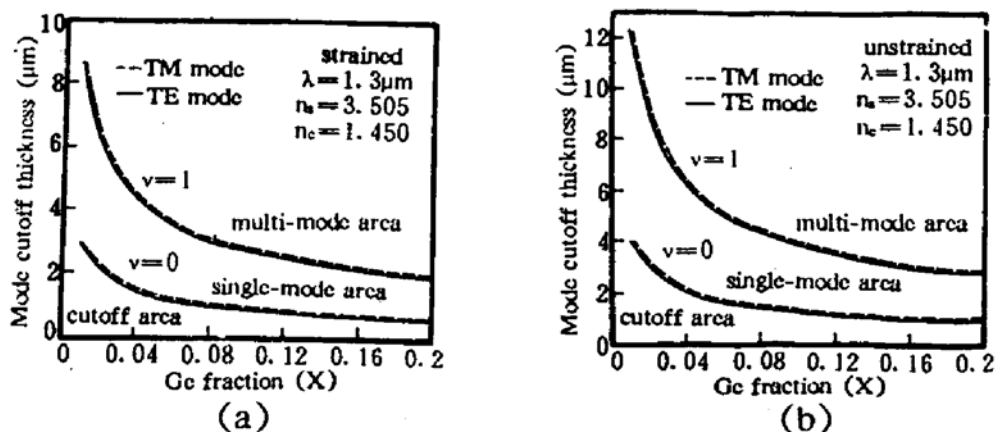


Fig. 3 (a) the mode cutoff thickness vs Ge content for strained SiGe/Si rib waveguides in Y direction

(b) the mode cutoff thickness vs Ge content for unstrained SiGe/Si rib waveguides in Y direction

从 y 方向上看, SiGe/Si 脊形波导是非对称结构, 即上覆盖层与下覆盖层的折射率不同, 因此从图中看出: 当 d 位于 $\nu = 0$ 曲线以下区域时, 会出现基模完全截止情况。Ge 含量确定后, 可由图中曲线适当选择波导芯 SiGe 层的厚度, 保证脊形波导在 y 方向的单模性。另外从图 3(a)、(b) 比较可看出, 对应同样的锗含量, 应变 SiGe 的模截止厚度小于非应变情况。这是由于应变时波导芯的折射率增量较大的缘故。

SiGe/Si 脊形波导在 x 方向上的模截止方程可由下式表示^[7]:

$$(4k_0 R/T)[(WT/2 + 1)G - \tan^{-1} G] = 2m\pi \quad (6)$$

$$G = \{[1 - T(x_1 - W/2)]^{-2} - 1\}^{1/2} \quad (7)$$

其中 m 是 x 方向的模数, R 和 T 分别为:

$$R = (\nu + 1)\pi/(S + k_0 d) \quad (8)$$

$$T = k_0 \tan \alpha_0 / (S + k_0 d) \quad (9)$$

对于 TE 模
$$S_{TE} = (n_f^2 - n_s^2)^{-1/2} + (n_f^2 - n_c^2)^{-1/2} \quad (10)$$

对于 TM 模
$$S_{TM} = [n_s^2/n_f^2(n_f^2 - n_s^2)]^{1/2} [n_c^2/n_f^2(n_f^2 - n_c^2)]^{1/2} \quad (11)$$

从(6)~(11)式由给定的锗含量(即给定 n_f)和 SiGe 层厚度 d 可得 SiGe 脊形波导在 x 方向上的截止特性曲线。如图 4 所示。由该图可根据波导脊宽 W 确定保证承载模的波导外脊高 b 。

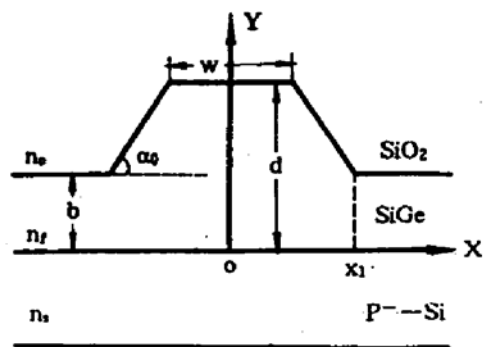


Fig. 2 the cross section of a SiGe rib waveguide

从 x 方向看脊形波导为对称波导，所以图中无零阶模截止曲线。

3 优化设计参数和验证结果

根据以上分析在 SiGe/Si 脊形波导的设计中参数应作如下优化选择：1) 在 $0.02 \leq x \leq 0.05$ 范围选取 SiGe 层的 Ge 含量，不妨取 $x = 0.3$ 和 $x = 0.05$ 两种；2) 为了保证在 y 方向承载单模，从图 3(a)可知：当 $x = 0.03$ 时，SiGe 波导层的厚度应大约在 $1.7 \mu\text{m} \sim 5.1 \mu\text{m}$ 范围，取 $d_1 = 5 \mu\text{m}$ ；当 $x = 0.05$ 时， $1.2 \mu\text{m} < d < 3.8 \mu\text{m}$ ，取 $d_2 = 3 \mu\text{m}$ 。比较可知 d_1 更接近于大截面要求。从图 1 可看出： d_1 远小于可能产生大量失配位错的临界厚度， d_2 也没有超过 $x = 0.05$ 对应的失配临界厚度(约为 $4 \mu\text{m}$)；3) 当 $x = 0.05$ 时，可由图 4 得对应于波导脊宽为 $6 \mu\text{m}$ 时保证承载单模的外脊高 $b_2 \geq 2.45 \mu\text{m}$ ，同理当 $x = 0.03$ 时也可由类似的曲线确定承载单模的外脊高 b_1 ，至此，SiGe/Si 脊形波导的结构尺寸完全确定。

SiGe/Si 脊形波导的制作由下面工艺流程实现：分子束外延 SiGe 层 → 低温氧化 → 光刻 → 各向异性腐蚀(KOH : H₂O = 7 : 3; T = 80°C) → 切片 → 侧面抛光，获得光波导的耦合端面。

图 5(a)是采用上述工艺和选取 $x = 0.05$ 对应的优化设计参数制作的波导端面照片。图 5(b)是通过红外变像管观察到的明亮光点照片，该近场模斑呈单模特性，用光功率计初步测量传输损耗约为 0.5 dB/cm ，从而验证了上述优化分析的合理性。光波导单模性和损耗测量系统见图 6。

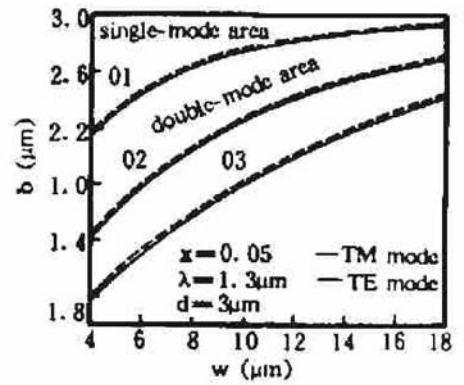


Fig. 4 the mode cutoff of SiGe/Si waveguide in x direction

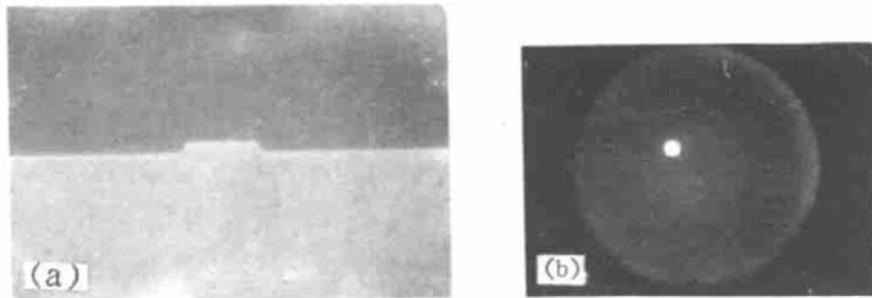


Fig. 5 (a) photograph of SiGe/Si rib waveguide polished facet $x = 0.05$, $d = 3 \mu\text{m}$, $W = 6 \mu\text{m}$, $b = 2.45 \mu\text{m}$. (b) near-field patterns of SiGe/Si rib waveguide

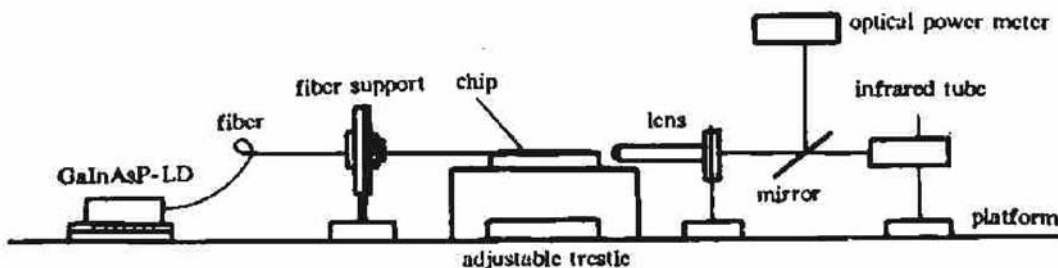


Fig. 6 SiGe/Si rib waveguides measurement system

参 考 文 献

- [1] R. A. Soref, B. R. Rennett, Electrooptical effects in silicon. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, 23(1): 123~129
- [2] R. A. Soref, J. 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, 22(6): 873~879
- [3] J. Schmidtchen, A. Splett, B. Schuppert *et al.*, Low loss single mode optical waveguides with large cross section in silicon-on-insulator. *Electron. Lett.*, 1991, 27(16): 1486~1488
- [4] R. A. Soref, F. Namavar, J. P. Lorenzo, Optical waveguiding in a single-crystal layer of germanium silicon grown on silicon. *Opt. Lett.*, 1990, 15(5): 270~272
- [5] Y. M. Liu, P. R. Prucnal, Deeply-etched single mode GeSi rib waveguides for silicon-base optoelectronic integration. *Electron. Lett.*, 1992, 28(15): 1434~1435
- [6] R. People, Physics and application of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ strained-layer heterostructures. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, 22(9): 1696~1710
- [7] 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体色散效应. *光学学报*, 1991, 11(8): 727~732

The Optimum Analysis and Design of SiGe Rib Optical Waveguides

Gao Yong Li Guozheng Liu Enke Liu Xiding

(*Electronic Engineering Department, Xian Jiaotong University, Xian 710049*)

(Received 29 December 1994; revised 21 February 1995)

Abstract Based on the fundamental demands of the SiGe rib optical waveguides in design, the structure factors to be responsible for the propagation characteristics are discussed and optimized. The effectivity of the design is conformed by a fabrication result of SiGe rib optical waveguides.

Key words SiGe, rib waveguide, optimum.