

# 硅光波导的束传播法设计及制备

潘 姬 赵鸿麟 杨恩泽

(天津大学电子工程系, 天津 300072)

**摘 要** 报道用束传播法(propagating Beam Method)模拟设计、指导硅大断面单模脊形光波导的制备工艺。应用傅里叶变换法计算了硅光波导中导模的传播常数。对实际研制成功的 SIMOX 及 Si/Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si 单模脊形光波导, 比较了其性能差异并给予理论解释。

**关键词** 硅光波导, 束传播法(PBM)。

## 1 引 言

80年代中期,理论和实验均证实硅单晶对波长 $\lambda = 1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的光波是透明的,且其折射率可用载流子浓度调节<sup>[1]</sup>。人们对硅光集成产生巨大兴趣,8年来,制备硅单模脊形光波导的技术已数次突破<sup>[2~4]</sup>。近二年来研制成功的 Si/Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si 单模脊形光波导,样品已能满足硅光集成的要求<sup>[4]</sup>。今后的主要工作是理论上的进一步完善和工艺上的进一步稳定。

设计硅脊形光波导,原则上可以依据单模理论<sup>[5]</sup>。但设计者设计的时候无法看到波束在光波导中的传播情况。为了稳妥,一般设计多种几何尺寸及工艺参数,以期最后能得到单模样品。实际结果往往也得到一些多模样品。束传播法<sup>[6]</sup>的显著优点之一是它能具体显示光束在波导中的传播过程。改变光波导的几何尺寸及工艺参数,它能显示光束传播时维持单模或分解为多模。此外,束传播法结合离散傅里叶变换或快速傅里叶变换,能比较快速地求出单模或多模光波导的传播常数。

本文研制  $n/n^+$ 、SIMOX 及 Si/Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si 三种大断面单模脊形光波导时同时研究束传播法的。经验证明,应用束传播法于硅光波导的制备,能加深对光波导理论的理解,能更有把握地制备合乎要求的硅光波导。

## 2 大断面脊形单模光波导的模拟设计。

首先介绍单模条件的束传播法模拟设计。

在 Si 光集成中,对脊形光波导的要求之一必须是大断面,即脊高  $b$  及脊宽  $a$  要等于  $10 \mu\text{m}$  左右如图 1 所示。目的是在输入输出端和单模光纤间提高耦合效率。在大断面的前提下,要光波导仅通基模,原则上可依据单模条件<sup>[5]</sup>:

$$r \leq \frac{1}{2}; \quad \frac{a}{b} \approx 0.3 + \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (1)$$

(1)式未给出  $a/b$  的下限, 实际上其值太小时光波导是截止的。再者, 依(1)式设计光波导不能得到光波在其中传播的图像。

束传播法是 Helmholtz 方程

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + k_0^2 n^2(x, y, z) E = 0 \quad (2)$$

描述的光波在光波导中传播时的近似数值解。式中  $n(x, y, z)$

是折射率分布。本题假设沿传播方向  $z$  折射率无变化,  $n(x, y)$  如图 2 所示。垂直轴标出  $n(x, y)$  数值。复盖层是高阻硅, 其折射率为 3.5。脊形区由  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  组成, 其折射率略高于 3.5。

束传播法先假设光波在均匀介质  $n_0$  (一般取光波导复盖层折射率) 中传播。前进  $\Delta z$  后再依据  $E(x, y, z)$  所处位置的实际  $n(x, y, z)$  给予校正, 方程(2)原是双边值问题, 束传播法将其简化为单边值或起始条件问题。起始条件即输入光波  $E_0(x, y, z_0)$  是可以设置的。

$E(x, y, z)$  沿  $z$  方向逐步推进的运算法有多种<sup>[6]</sup>。本文采用二维快速傅里叶变换-束传播法。脊形光波导可用有效折射率法简化为计算一维平板波导  $E(x, z)$ 。离散的  $E_0(x, z_0)$  输入光波导后, 沿横向展成有限长的离散傅里叶级数。利用主值区间中离散傅里叶级数和离散傅里叶变换的一致性, 能求得每前进  $\Delta z$  后的  $E(x, z)$  值。绘出光波传输过程的清晰图像。

图 3 的输入光波是波长  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$  的高斯光束  $E(x, 0) \sim \exp(-x/3.7 \mu\text{m})^2$  在 GeSi 光波导中的传播情况。图 3 中波导层折射率取 3.50172, 复盖层取 3.50。图 3 (a) 的波导宽度为  $8 \mu\text{m}$ 。光束是以纸面射向读者的, 可以看出, 这种条件下光束在波导中维持单模形式。图 3 (b) 是宽度变为  $12 \mu\text{m}$  时光波在其中的传播情况。这时单模的输入光波在光波导中传播时分解为多模。

用这种束传播法设计光波导, 有结果准确、迅速且直观的优点。

对快速傅里叶变换-束传播法的计算式稍做变动, 可以计算光波导中导模的传播常数<sup>[7]</sup>。

图 4 是一个计算实例的结果。横轴是传播常数  $\beta$  值, 纵轴是归一化的  $P(\beta)$  值, 五个尖峰表明此光波导传播五阶模, 其  $\beta$  值均已在横轴上标出。为了使结果具有典型性并便于和准确结果对比, 本实例计算的是厚度为  $12 \mu\text{m}$  的平板 GeSi 光波导。对  $z$  轴求  $P(z)$  时电场值取  $x = 3$  即  $E(3, z)$ 。表 1 是上述束传播法结果和分析法结果的对比。分析法是 TE 模的特征方程经迭代法算得的。

表 1 表明束传播法的结果还有一定的误差, 对有限长的窗口,  $\beta$  的取样点不可能和实际  $\beta_i$  重合, 此外, 计算  $E(x, z)$  时,  $\Delta E$  及  $\Delta x$  的取值也会引出误差。如果相应增加计算量。原则上可以再提高精度。

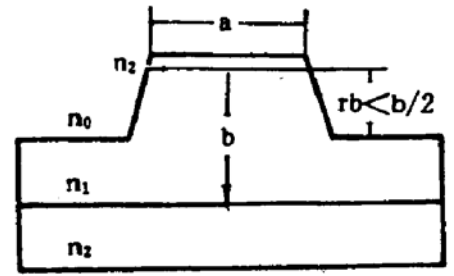


Fig. 1 Scheme of rib waveguide

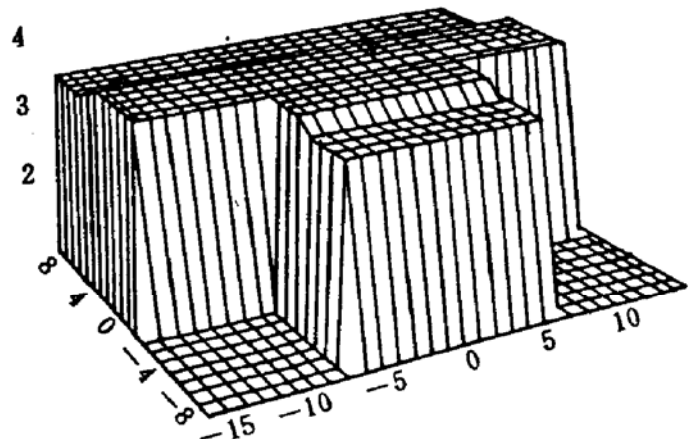


Fig. 2 The index  $n(x, y)$  in rib waveguide. (The units of  $x$  and  $y$  axes are  $\mu\text{m}$ )

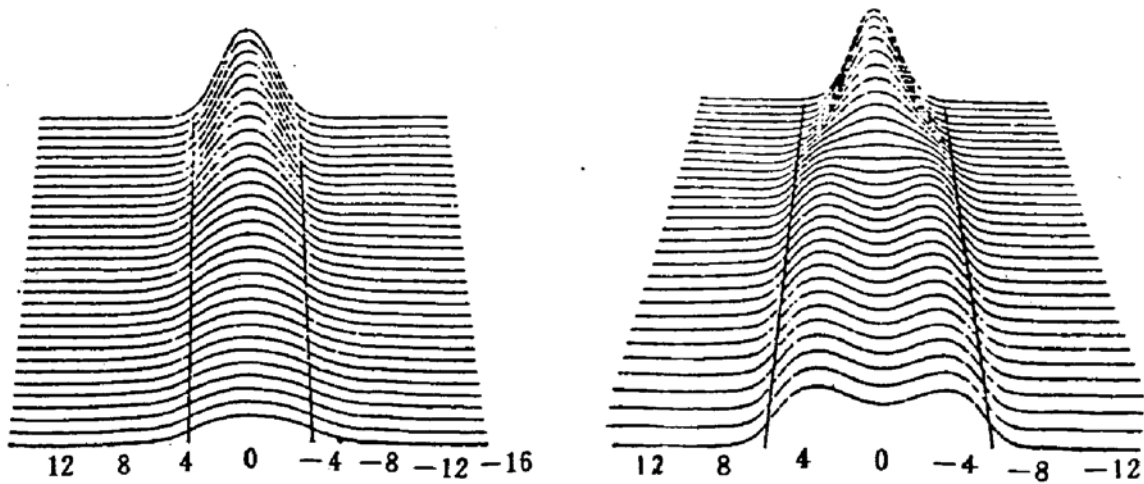


Fig. 3 The propagation of 1.3  $\mu\text{m}$  light in Si optical waveguides (a) single-mode waveguide; (b) multi-mode waveguide

Table 1 The results of propagation constant  $\beta$  by PBM and analytical method

	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$
PBM	169703.1	169539.7	169401.5	169288.4	169213.0
analytical method	169713.1	169585.8	169476.7	169341.4	169193.1

### 3 实际 Si 光波导样品测量结果及其比较

全硅光集成的发展过程中, 制备光波导的初期技术是在低阻 Si 单晶片上外延生长高阻波导层, 即  $n/n^+$  或  $p/p^+$  型硅光波导。这种光波导因高浓度载流子对光的吸收而使传播损耗  $>15 \text{ dB/cm}$ 。SIMOX 硅光波导的研制成功是一重大突破, 它大幅度改善了  $n/n^+$  型的缺点, 但是仍存在数值孔径过大的缺点, 现在研制成功的 GeSi/Si 合金材料光波导, 又将硅光波导制备技术提高到一个新水平。它的样品性能已能进入实用水平。

图 5 是 1.3  $\mu\text{m}$  的激光经单模光纤输出(它就是光波导的输入光波)后分别再经过 SIMOX 光波导和 GeSi/Si 光波导的输出光场分布。图 5(a)是单模光纤的输出, 光场分布呈非常陡锐形状。因为显示器的 Y 轴已经饱和。实际高度应比照片还高, 图 5(b)和图 5(c)说明二种光波导均输出单模光波。

在研制上述大断面脊形单模 SIMOX 光波导及 GeSi 光波导时, 设计方法是将束传播法和单模理论结合起来进行的。以验证证明这样做能显著提高制备的把握性, 这些光波导的制备工艺及测量方法等, 过去已经报导<sup>[2,4]</sup>。

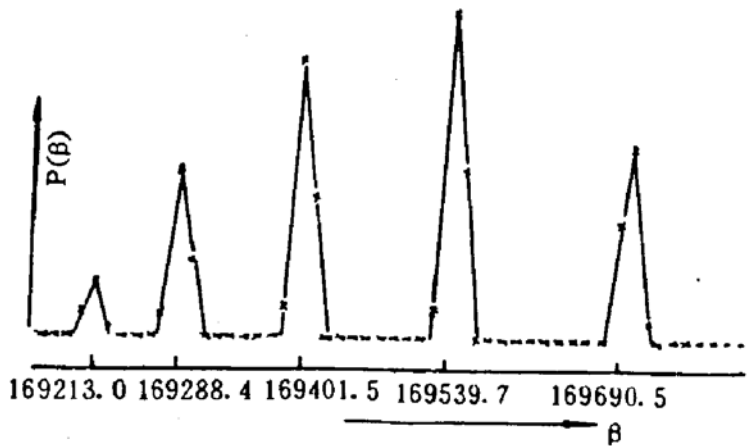


Fig. 4  $P(\beta)$  are peaked up at eigenvalues  $\beta$ .

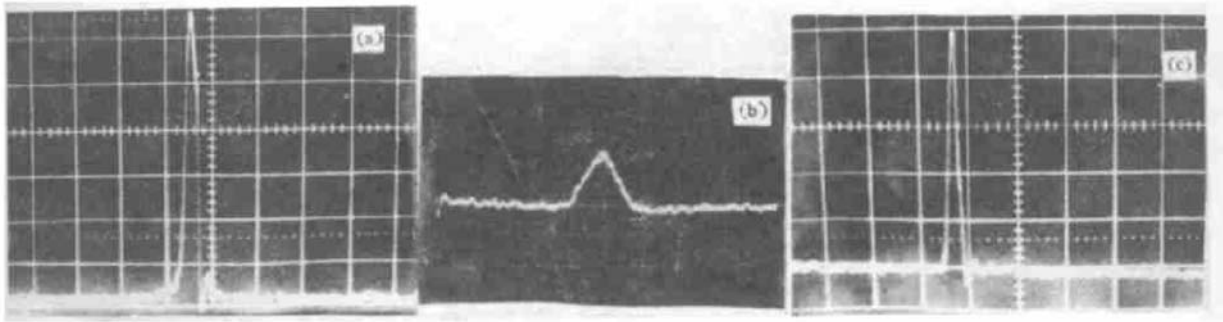


Fig. 5 The light field distribution of single-mode fibre, SIMOX and GeSi/Si waveguides.

(a) single-mode optical fibre.

(b) single-mode SIMOX waveguide ( $\beta_0 = 169098.7$ )

(c) single-mode GeSi/Si waveguide ( $\beta_0 = 169670.5$ )

表 2 是单模光纤、SIMOX 及 GeSi 光波导部分性能比较。从图 5 或表 2 可以看出,新近研制的 GeSi 光波导样品,其性能几乎全面优于 SIMOX 光波导,而且工艺难度及成本都较低。这是因为。

1) SIMOX 硅光波导的下复盖层是  $\text{SiO}_2$ , 它和波导层间的折射率差很大, 于是其数值孔径偏大。这是 SIMOX 光波导输出光波的光场较宽的原因。

2) SIMOX 硅光波导的埋层  $\text{SiO}_2$  的厚度一般只有 300 nm 左右。要完全限制 1.3  $\mu\text{m}$  光在波导层中传播, 这个厚度是不够的。何况一般不容易形成致密高质量的  $\text{SiO}_2$  埋层。由此可分析它的传播损耗大于 GeSi 光波导。

Table 2 Performances comparison among single-mode fibre SIMOX and GeSi waveguides

	light field distribution	propagation losses <sup>[2,4]</sup>	size of cross section	NA <sup>[4]</sup>	processes sophistication	cost
single-mode fibre	very sharp	$\sim 0.1 \text{ dB/km}$	core diameter $\sim 10 \mu\text{m}$	$\sim 0.2$		
SIMOX waveguide	wide & low	2 dB/cm	rib height 6~8 $\mu\text{m}$ rib width 8~12 $\mu\text{m}$	$\sim 3.0$	high	high
GeSi waveguide	sharp	0.7 dB/cm	same as SIMOX	0.1~0.2	common	common

## 4 结 论

本文介绍了研制大断面脊形单模硅光波导时,用束传播法进行设计的方法及优点。束传播法能准确、迅速并形象地显示光波在光波导中的传播过程。束传播法计算光波导中导模的传播常数是比较方便的。当计算多模光波导的传播常数时,它更显示出优越性。本文也介绍了用束传播法结合单模理论设计并制备成功的二种 SIMOX 及 GeSi/Si 光波导。样品的实测性能表明, GeSi/Si 光波导优于 SIMOX 光波导。并从理论及工艺起因方面解释了这些结果。

## 参 考 文 献

- [1] 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. Quantun. Electron.*, 1986, 22(6): 873~879
- [2] 潘 姬, 赵鸿麟, 杨恩泽等, 硅 SIMOX 单模脊形光波导研制. *半导体学报*, 1994, 15(2): 104~108
- [3] 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
- [4] 潘 姬, 赵鸿麟, 杨恩泽, 硅衬底上锗硅合金光波导的研制. *光学学报*, 1994, 14(6): 1~5
- [5] R. A. Soref *et al.*, Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO<sub>2</sub>. *IEEE J. Quantun. Electron.*, 1991, 27(8): 1971~1974
- [6] Working group 1, Cost 216, Comparison of different modelling techniques for longitudinally invariant integrated optical waveguides. *IEEE Proceedings, Pt. J.*, 1989, 136(5): 273~280
- [7] M. D. Feit, J. A. Fleck, Calculation of dispersion in graded index multimode fibres by a propagating-beam method. *Appl. Opt.*, 1979, 18(16): 2843~2851

## The PBM Design and Fabrication for Silicon Waveguides

Pan Ji      Zhao Honglin      Yang Enze

(*Electronic Engineering Department of Tianjin University, Tianjin 300072*)

(Received 9 March 1994; revised 21 May 1994)

**Abstract** This paper reports the use of propagating beam method (BPM) to simulate and design the large cross-section single mode rib waveguides. The Fourier transformation is used to calculate the propagating constants of the Si waveguides. For the practical SIMOX and Si/Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si single-mode rib waveguides, Comparison of the performance differences and theoritical explanation have been given.

**Key words** Si optical waveguides, propagating beam method.