

锗硅脊形光波导 Y 分支器的 模拟及试制*

潘 姬 赵鸿麟 杨恩泽

(天津大学电子工程系 天津 300072)

摘要 继研制成功单模脊形锗硅合金光波导后,进一步用这种光波导试制 Y 分支器.文中用束传播法 BPM 首先从理论上分析了波长 $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ 的光波在分支器中的传播特性,模拟计算了模场的传播及损耗.其次叙述了实际锗硅 Y 分支器的制造工艺及测量结果.结果表明,激光束耦合进锗硅分支器的输入端后,分支器的二路输出端成功输出均匀的单模光波.

EEACC: 4130, 4140

1 引言

全硅光集成技术自 1985 年问世以来,其制备大断面单模条形光波导的方法经过多次重大技术突破,终于获得成功.目前制备的锗硅合金光波导,已达到硅光集成的实用水平.

初期的 n/n^+ 或 p/p^+ 硅外延光波导^[1, 2],因衬底吸收光能量而使传播损耗过大. SIMOX 硅光波导^[3, 4]大幅度降低了传播损耗,同时研制中也解决了用厚度近 $10 \mu\text{m}$ 的多模平板波导制备单模脊形波导.是硅光波导制备技术的重大进展.还存在的一个缺点是因波导层和衬底 SiO_2 的折射率相差很大,于是光波导的数值孔径显著大于光纤数值孔径,导致耦合失配.现已研制成功的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 光波导^[5, 6],保留了 SIMOX 光波导的各项优点,同时可以通过调节 GeSi 合金层中的含 Ge 量改变合金层的折射率,将光波导的数值孔径调节到合适值.

Y 分支器是光束的分支、合成、光调制器、光开关、Moch-Zehnder 干涉仪及 A/D 转换

* 天津市自然科学基金资助项目

潘 姬 女, 1937 年生, 副教授, 从事半导体器件教学和半导体光集成技术的研究.

赵鸿麟 男, 1936 年生, 教授, 中国电子学会高级会员, 教育学会委员, 从事半导体光集成及器件模拟研究工作.

杨恩泽 男, 1919 年生, 1943 年获武汉大学通讯组硕士学位, 教授, 国家光电子学重点联合实验室学术委员会委员, 从事光纤通信研究工作.

1994 年 1 月 30 日收到初稿, 1994 年 4 月 14 日收到修改稿

器等光集成器件的基础. 制备 Y 分支器的困难是光能量在分支区附近的辐射损耗. 当分支夹角大于 1° 时, 辐射损耗随夹角增加急剧上升. 夹角很小则器件很长给制备带来困难. 再者, 很小的夹角会影响光束在二支路上的均分.

本文报告用 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 单模脊形光波导研制 Y 分支器. 光束传播法 BPM 是当前公认的分析波导中光波传播的强有力工具, 下面首先用 BPM 分析 Y 分支器中 $1.3 \mu\text{m}$ 光束的传播特性. 然后介绍 Y 分支器的制备工艺及测量结果.

2 Y 分支器特性的 BPM 模拟设计

Y 分支器是光集成的基本功能单元. 国内外均用铌酸锂等材料进行制备. 国内已有用 BPM 计算 Y 分支器的某些性能^[7], 未见针对具体器件进行设计.

光波在光波导中传播的标量 Helmholtz 方程为

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2} n^2(x, y) E = 0 \quad (1)$$

式中 E 是横向电场矢量. z 是光波的传播方向, ω 是光波的圆频率, n 是折射率, 在光波导中光波频率是固定的, n 一般是 x, y 的函数. BPM 是解方程(1)的方法, 其主要思想是先假设光波在均匀介质 n_0 中传播, 待传播 Δz 距离后, 再用其实际介质 n 予以校正, n_0 一般取波导复盖层的折射率. 为了减少误差, Δz 一般取光波波长 λ 的数量级.

初期的 BPM^[8]是将待求的 E 沿横向展成傅利叶级数 DFS, 其系数是 z 函数, 利用在主值区间中 DFS 和离散傅利叶变换 DFT 的一致性, 不断用 DFT 或 FFT 的正反变换求取每传播 Δz 后的光波电场 E . 数年来, 方程(1)的解法不断有所更新, 本文采用的方法是^[9]: (1) 式的解为

$$E(x, y, z + \Delta z) = \exp[A\Delta z]E(x, y, z) \quad (2)$$

式中

$$A = -j \frac{\nabla_t + k_0^2[n^2 - n_0^2]}{2k_0 n_0} \quad (3)$$

∇_t 是横向 Laplace 算符. 接(2)中指数项展成 Taylor 级数

$$\exp[A \cdot \Delta z] \simeq \sum_{m=0}^M \frac{A^m}{m!} \Delta z^m \quad (4)$$

(2)式可重写为

$$\begin{aligned} E(x, y, z + \Delta z) &\simeq \left[\sum_{m=0}^M \frac{(A\Delta z)^m}{m!} \right] E(x, y, z) \\ &= \sum_{m=0}^M E_m \end{aligned} \quad (5)$$

一般, 入射光束的起始值 $E_0(x, y, z_0)$ 是知道的, 利用递归式 $E_m = (\Delta z \cdot A/m) E_{m-1}$ 不难由 E_0 依次推求每前进 Δz 的 E .

我们研制的锗硅合金大断面单模脊形光波导^[6], 为了能和单模光纤的芯径片配, 脊形的内脊高 $h=6-8 \mu\text{m}$, 脊宽 $W=8-12 \mu\text{m}$, 制备 Y 分支器时, 输入及输出的二支光波导均采用上述结构. 模拟计算这种 Y 分支器的特性也采用上述实际数据, 脊形光波导

在 x, y 方向均受复盖层约束, 模拟时用有效折射率法将脊形波导转化为仅 x 方向受约束、相当厚度为 W 的平板波导. 入射光波长 $\lambda=1.3 \mu\text{m}$, 设其强度为高斯分布, x 方向相邻离散点间距离 $\Delta x=0.5 \mu\text{m}$, $\Delta z=2.0 \mu\text{m}$. Y 分支器的结构如图 1 所示.

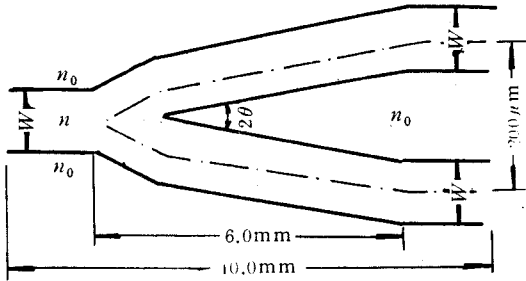


图 1 Y 分支器结构

图 2 是部分模拟结果. (a)(b) 二图中的脊形光波导, 其脊宽 $W=8 \mu\text{m}$ 复盖层折射率为 1.0 及 3.5, 波导层的含锗量小于 10%^[6]. (a) 的分支半角 $\theta=0.5^\circ$, (b) 的 $\theta=1.0^\circ$. x 方向的计算范围为 $-16 \sim 16 \mu\text{m}$. z 方向, 实际器件的长度为 1.0 cm, 模拟仅计算了 $250 \mu\text{m}$. 图 2 清楚地表明, 单模光输入后, 开始

稳定地通过过渡区及分支区, 进入分支波导后仍以单模形式向前传播, 说明设计的光波导是满足单模条件的.

分支半角 θ 愈大, 一般认为光波在分支处的辐射损耗愈大^[10], 体现在分支波导中传播的单模光波的振幅愈小. 本文对此未作深入研究, 有限点的具体计算表明, $\theta=0.5^\circ$ 时的传播损耗 $L=-4.95 \text{ dB/cm}$, $\theta=1.0^\circ$ 时的 $L=-8.3 \text{ dB/cm}$.

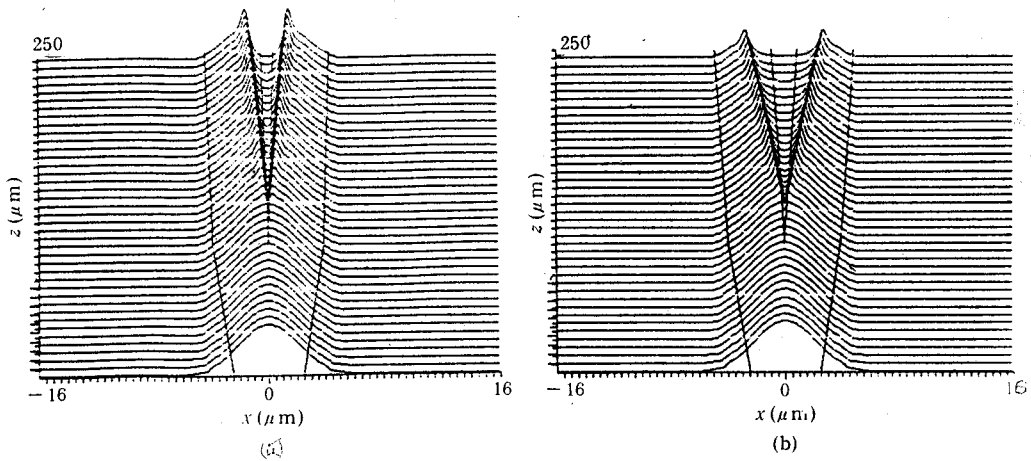


图 2 $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ 光波在锗硅 Y 分支器中的传播

(a) $W=8 \mu\text{m}$, $\theta=0.5^\circ$, $L=-4.95 \text{ dB/cm}$

(b) $W=8 \mu\text{m}$, $\theta=1.0^\circ$, $L=-8.3 \text{ dB/cm}$

3 Y 分支器的制备及测量

Y 分支器的制备工艺如图 3 所示. 首先是制得波导层厚度 $6 \sim 8 \mu\text{m}$ 、折射率差符合要求的锗硅平板波导^[6]. 其次是光刻、掩膜版的设计已如上述. 脊形波导的脊宽 $8 \sim 12 \mu\text{m}$. 分支半角 θ 分 0.5° , 1.0° , 1.5° 多种, 第三步定向刻蚀是形成各分支光波导为单模光波导的关键工艺、要按照单模条件^[11, 12]及实际经验掌握刻蚀深度. 为了检验单模光波导的形

成否及其质量, 掩膜版上每一 Y 分支器旁边均有一条陪测的直光波导, 测量时先测直光波导的通光情况, 质量良好才测 Y 分支器的性能. 端面抛光是众所周知的高难工艺, 我们用四百倍显微镜检测, 镜面无缺陷方可测量通光情况, 据经验端面抛光质量并未解决彻底. 最后一步测量工作主要在清华大学集成光电子学国家重点联合实验室中进行的, 测量装置和测量 SIMOX 光波导及锗硅光波导的装置相同^[4, 6].

图 4 是锗硅 Y 分支器一个样品的光场及模斑分布图. 图 5 是其相应的陪测光波导的光场及模斑图(图 4, 5 见图版 1). 图 5 表明, 陪测光波导的性能很好. 光场是一个尖锐的峰, 模斑是一个大小接近单模光纤的圆斑, 说明陪测光波导是单模光波导. 对大量我们研制的

锗硅单模脊形光波导测量, 得出其传播损耗部分值已达到小于 1 dB/cm ^[6]. Y 分支器的测量结果图 5 表明, 在分支器的二支输出端已成功输出均匀的单模光波, 达到了 Y 分支器对光束分支的要求. 我们也初步测量了 Y 分支器的插入损耗, 其数值比模拟结果偏大, 目前尚在分析成因.

结论: 已成功用 BPM 模拟锗硅合金 Y 分支器中 $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ 光波的传播, 经分支区后, 光束仍以单模形式在分支波导中传播, 说明 Y 分支器设计的正确. 用相同的结构参数, 实际制备了锗硅合金 Y 分支器. 测量结果表明, $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ 的激光从 Y 分支器输入端输入后, 分支器的二支输出端, 输出均匀的单模光波, 实现了分支器对单模光波进行分支的基本功能. 分支器插入损耗的测量值偏大, 尚须进一步解决.

参 考 文 献

- [1] R. A. Soref and J. P. Lorenzo, *Electron. Lett.*, 1985, **21**(21): 953-954.
- [2] 赵鸿麟、潘姬、杨恩译、吉林大学自然科学学报, 1990, 特刊, p. 160-161.
- [3] B. L. Weiss, G. T. Reed *et al.*, *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 1991, **3**(1): 19-21.
- [4] 潘姬、赵鸿麟、杨恩译等, *半导体学报*, 1994, **15**(2): 115-118.
- [5] S. F. Pesarcik, G. V. Treyz *et al.*, *Electron. Lett.*, 1992, **28**(2): 159-160.
- [6] 潘姬、王洪波、赵鸿麟、杨恩译, 94' 光电子器件与光集成技术年会.
- [7] CCI0'93, 第七届全国集成光学学术讨论会论文集.
- [8] M. D. Feit and J. A. Fleck, *Applied Optics*, 1978, **17**(24): 3990-3998.
- [9] A. Splett, M. Majd *et al.*, *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 1991, **3**(5): 466-468.
- [10] Z. Weissman, E. Marom and A. Hardy, *Opt. Lett.*, 1989, **14**(5): 293-295.
- [11] R. A. Soref, T. Schmidtchen *et al.*, *IEEE J Quantum Electron.*, 1991, **27**(8): 1971.
- [12] 潘姬、赵鸿麟、杨恩译, *固体电子学研究与发展*, 1994, **14**(1): 91-95.

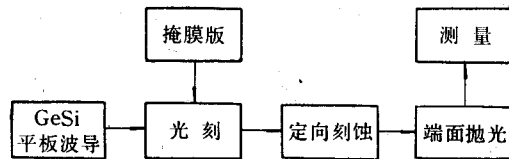


图 3 锗硅合金 Y 分支器制备过程

Simulation and Fabrication of GeSi Rib Waveguide Y Power Divider

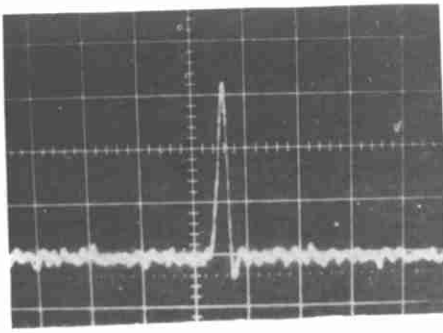
Pan Ji, Zhao Honglin and Yang Enze

(*EE Dept. of Tianjin Univ., Tianjin 300072*)

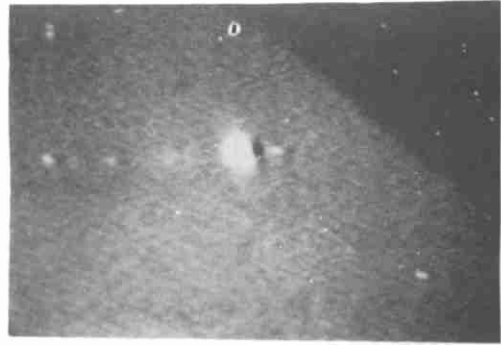
Received 30 January 1994, revised manuscript received 14 April 1994

Abstract In all-silicon integrated optics, the newest technique for fabricating strip single-mode waveguide is GeSi alloy rib waveguide. After being succeeded in preparing GeSi rib waveguide, this paper reports the fabricating of Y power divider with the waveguide. First, the BPM simulating the $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ light propagating in the divider is used to calculate the light field distribution and propagation losses. Secondly, the fabrication processes and measurement of the practical GeSi Y divider are presented. Results show, after inputting the $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ light into the divider, the two outputs of the divider outputs single-mode wave successfully.

EEACC: 4130, 4140

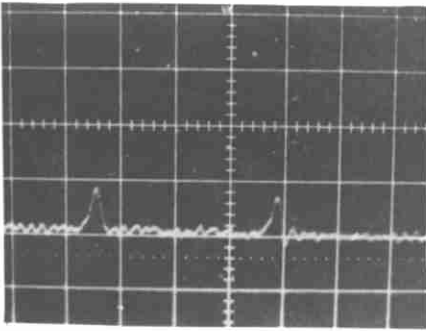


(a) 光场



(b) 模斑

图 4 锗硅 Y 分支器的光场及模斑分布 [$W=8 \mu\text{m}$, $\theta=1.0^\circ$]



(a) 光场



(b) 模斑

图 5 锗测光波导的光场及模斑分布