

GeSi 合金 1×4 Y 级联分束器 的有限差分束传播法模拟设计

赵鸿麟 潘 姪 潘善臻 杨恩泽

(天津大学电子工程系, 天津 300072)

摘 要 进一步研究二个问题:(1) 理论模拟的方法由快速傅里叶束传播法(FFT-BPM)改为有限差分束传播法(FD-BPM), 并比较了两者的优缺点。(2) 模拟设计了对象提高为由 GeSi 合金单模脊形光波导组成的 Y 级联 1×4 光分束器。结果表明, 有限差分束传播法比快速傅里叶束传播法及显形有限差分束传播法(EFD-BPM), 除了数学比较容易外, 计算速度也快一些。尤其是对传播步长 Δz 的敏感性, 有限差分束传播法远没有快速傅里叶束传播法那样严重, 便利了束传播法方法的采用。正如束传播法成功地应用于 GeSi 合金光波导及 Y 分支器的理论设计, 现在用了 1×4 Y 级联分束器同样得到预想的结果。光束在分束器中传播逐步分成二束再分为四束。符合设计要求。

关键词 硅光集成, 光分束器, 束传播法。

1 引 言

光在介质光波导及其器件中传播遵守亥姆霍兹(Helmholtz)方程, 是二阶非线性微分方程。这类方程的解, 历史上已作了深入的研究。例如半导体器件模拟中求器件中的电场分布需解类似的泊松(Poisson)方程^[1]。但是, 解亥姆霍兹方程有其特殊性。1978年 Feit 和 Fleck 为克服光在输出端的边界条件无法确定这一困难提出束传播法(BPM), 将在整个传播距离 Z 中的求解分解为逐段求解, 在每一段 Δz 中假定介质折射率均匀, 每一段结束时予以修正^[2], 只要 Δz 足够小, 这种近似是可行的。初期的束传播法, 其数学方法是将横波光场展成离散傅里叶级数。光波每传播一步 Δz , 要分别进行正反离散傅里叶变换。采用傅里叶快速算法的快速傅里叶束传播法是一重大进步。但其计算步骤繁杂, 费时和对 Δz 限制严等缺点。

80年代不断探索在束传播法中有限差分法置换傅里叶变换。1990年 Chung 和 Dagli 提出了有限差分束传播法^[3]。这种方法在计算速度及时对 Δz 的限制等方面, 均比快速傅里叶-束传播法优越。本文将简要介绍这一方法, 并以 GeSi 合金光波导实例比较两者的差异。文中也给出了, 后来提出的显形有限差分束传播法的结果^[4]。

实践证明, 当大断面脊形硅光波导的结构参数符合单模条件时, 则单模光束输入后在其中传播始终维持单模形式。如果结构参数组成了双模光波导, 则输入的单模光波在其中转播

一定距离也呈双模。实际试制结果和上述模拟结果完全一致^[3]。用已成功的 GeSi/Si 大断面单模脊形光波导制作 Y 分支器后, 模拟时也表明单模光输入后, 在分支点处顺利分为二束光沿分支波导传播。实际制备结果也证明设计是正确的^[5]。

Y 级联分束器 1×2^N 是分束器的形式之一。本文探索 $N = 2$ 即 1×4 Y 级联分束器的模拟设计。如果本设计成功, 表明它有可能推广到 $N \geq 3$ 的情况, 为制备多路分束器奠定依据。

2 快速傅里叶束传播法与有限差分束传播法的比较

二维光波导经常结合有效折射率(EIM)将二维变为一维^[7]。亥姆兹方程为:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_y(x, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y(x, z)}{\partial z^2} - k_0^2 n^2(x, z) \varepsilon_y(x, z) = 0 \quad (1)$$

式中 $k_0 = \omega/c$ 。一般假设在波导中传播的是横的平面波, 波前等相位面和 Z 垂直, 于是

$$\varepsilon_y(x, z) = E(x, z) \exp(-jkz), \quad k = n_0 k_0 \quad (2)$$

式中 n_0 为某一参考折射率, 一般取覆盖层折射率。在束传播法中假设在 Δz 距离中, 光波在均匀介质中传播, 该介质的折射率为 n_0 。将(2)式代入(1)式得

$$-\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + 2jk_0 n_0 \frac{\partial E_y}{\partial z} = \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} - k_0^2 [n^2 - n_0^2] E_y \quad (3)$$

激光束在波导中可以假设是傍轴传播的, 即沿 Z 轴传播时没有显著发散。在这一假设下, (3)式左边的二阶导数可以忽略, 于是亥姆兹方程简化为菲涅尔(Frenel)方程:

$$2jk_0 n_0 \frac{\partial E_y}{\partial z} = \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + k_0 [n^2 - n_0^2] E_y \quad (4)$$

(4)式右边第一项用差分式代替(为书写方便, 用 E 替换 E_y):

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{E_{i-1}(z) + 2E_i(z) + E_{i+1}(z)}{\Delta x^2} \quad (5)$$

下标 $i-1, i, i+1$ 分别代表 X 方向的离散点, Δx 是 X 方向相邻离散点间的距离。

(5)式代入(4)式后, 并将其左右边都在 $(z, z + \Delta z)$ 区间中对 z 积分, 运用梯形公式后得

$$-aE_{i-1}(z + \Delta z) + bE_i(z + \Delta z) - aE_{i+1}(z + \Delta z) = aE_{i-1}(z) + cE(z) + aE_{i+1}(z) \quad (6)$$

式中 a, b, c 均为由 $\Delta z, \Delta x, n, n_0$ 等组成的系数。(6)式表明, $z + \Delta z$ 处的光场 $E(z + \Delta z)$ 是可以由 z 处的光场 $E(z)$ 得到的。因为入射光束是已知的(一般采用高斯束), 所以可以用(6)式逐步前进 Δz 计算得到光束在全程中的分布。这就是有限差分束传播法的计算方法。数学表达式的简洁, 运算方法的高效是有限差分束传播法独特的优点。

为了比较快速傅里叶束传播法与有限差分束传播法的差别, 用同一 486 微机计算成熟的 GeSi 合金光波导及 Y 分束器^[8,6]。结果是类似的。图 1、图 2 是 Y 分束器的计算结果。

图 1 是光束每前进一步 Δz 所需计算时间的对比。横坐标是 X 轴的离散格点数, X 轴的窗口是 $40 \mu\text{m}$, 纵轴是每步计算时间(sec)。从图清楚表明, 随着离散格点数的增加, 快速傅里叶

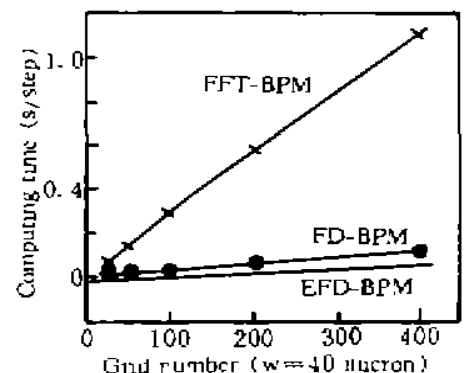


Fig. 1 Comparison of computing time

束传播法所需的计算时间急剧上升。这是因为要进行正反二次离散傅里叶变换运算,且每一离散点的值均需运算的关系。在有限差分束传播法中,随离散点数增加计算时间增加并不明显,是因为计算的矩阵是稀疏矩阵,除三条对角线上,其余元素都是零,不参与计算。所以离散格点的增加不会显著增加计算时间。

图 2 是不同步长 Δz 下三种计算方法引入的计算误差或损耗。横轴是 Δz , 单位是微米。纵轴是计算误差或损耗。其值取自 $z = 400 \mu\text{m}$ 处波前能量(功率)之和与输入功率之比。即 $Loss = 1 - P_{z=400}/P_{z=0}$ 。图 2 表明,仅当 $\Delta z < 1.8 \mu\text{m}$ 时,快速傅里叶束传播法的计算精度优于有限差分束传播法。随着 Δz 的增加,快速傅里叶束传播法的恶化是较快的。而有限差分束传播法则能保持相对平稳。在实际计算中,计算长度 z 都是几百微米以上,为节省机时均希望 Δz 能取大一些。在这方面有限差分束传播法也是优于快速傅里叶束传播法的。

图 3 的结果值得注意。一般认为,束传播法的数值误差随计算距离累积的。但图 3 表明,即使距离达 1 cm,数值误差引入的损耗值,只是有所起伏,而不会累积。

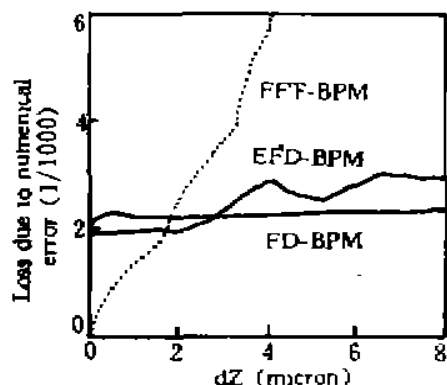


Fig. 2 Loss-dZ relationship

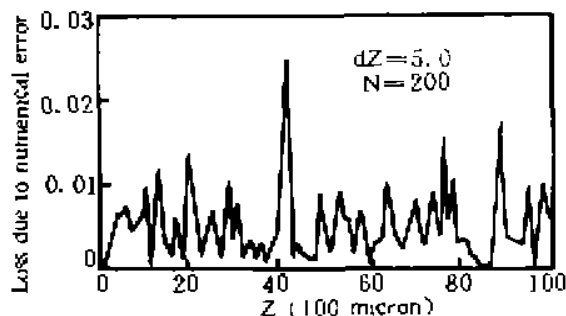


Fig. 3 Loss-Z relation of FD-BPM

3 1×4 Y 级联分束器的模拟

器件结构如图 4 所示。入射光从下方入射,传播至约 $180 \mu\text{m}$ 处开始第一次 Y 分支。再传播到 $1100 \mu\text{m}$ 处开始第二次 Y 分支。总传播长度为 $1800 \mu\text{m}$, 短于实际器件。例如光输入后在单模波导中要传播 $300 \sim 500 \mu\text{m}$, 现压缩基距离是为节省机时而效果是一样的。各分支角度为 1° 。单模脊形光波导的结构由 Si/GeSi/Si 合金组成,脊高 $6 \sim 8 \mu\text{m}$, 脊宽 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 。GeSi 层中含 Ge 量约 3%。

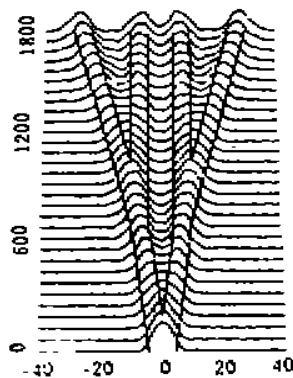


Fig. 4 Propagating wave in the 1×4 power splitter

$\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 的高斯光束在分束器中的传播过程如图 4 所示。该图已标出二级 Y 分支器的位置。此图表明,单模入射光束传播到第一个分支点是逐步开始分解。约传至 $800 \mu\text{m}$ 处已分解完毕,二束单模光分别在分支波导中传播。继续向前传播二束光均碰到第二次分支点。像第一次一样又开始分解,最后成功地分解为四束在四路单模波导中传播的单模光。

直接用三维方法模拟,其结果如图 5 所示。三维模拟不能像二维(图 4)那样可以连续描绘波的变化。只能抽取 z 等于某一数值处的数据绘图。图 5 分别是 $z = 0, 900$ 及 $1800 \mu\text{m}$ 的光场功率)分布。从图 5 表明,入射的单模光在设计了的 1×4 分束器中,分为 1×2 及 1×4 单模光。

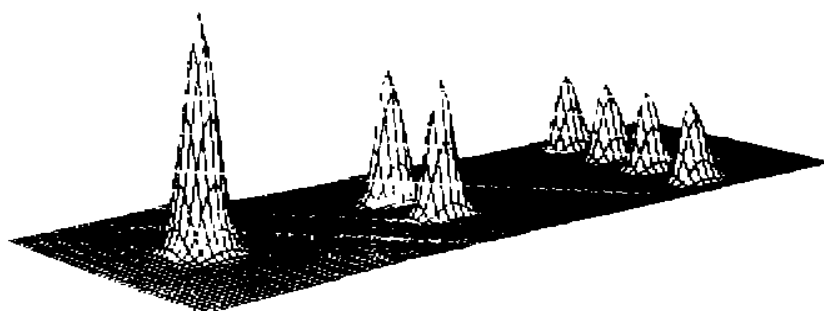


Fig. 5 Propagating light in 1×4 power splitter by 3-D simulation

结 论 1) 束传播法是模拟设计介质光波导及其器件的有效工具。实际应用中,有限差分束传播法比快速傅里叶束传播法更方便一些。主要表现在:有限差分束传播法的数据等理论及编程容易一些、计算速度快一些及对 Δz 的选取范围、更宽一些。(2) 用已试制成的 Si/GeSi/Si Y 分支器为结构单元。用三支 Y 分支器组成二级 1×4 分支器,模拟结果表明,入射单模高斯光束在分束器中顺利地分成四束光,以单模形式在指定波导中输出。

参 考 文 献

- [1] R. W. Kockney, The potential calculation and some applications. *Methods in Computational Physics*, 1970, 9: 134~211
- [2] M. D. Feit, J. A. Fleck, Light propagating in graded-index optical fibers. *Appl. Opt.*, 1978, 17(24): 3990~3998
- [3] Y. Chung, N. Dagli, An assessment of finite difference beam propagation method. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, QE-26(8): 1335~1339
- [4] Y. Chung, N. Dagli, Analysis of Z-invariant and Z-variant semi-conductor rib waveguides by EFD-BPM with nonuniform mesh configuration. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, QE-27(10): 2290~2305
- [5] 潘姬, 赵鸿麟, 杨恩泽, 硅光波导的束传播法设计及制备. *光学学报*, 1995, 15(3): 337~341
- [6] 潘姬, 赵鸿麟, 杨恩泽, 锗硅脊形光波导 Y 分支器的模拟及试制. *半导体学报*, 1995, 18(1): 62~65
- [7] 潘姬, 赵鸿麟, 杨恩泽, 全硅大断面脊形光波导传播特性的理论分析及实验结果. *固体电子学研究与进展*, 1994, 14(1): 91~95
- [8] 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): 603~607

Simulation of GeSi Alloy Y Cascade 1×4 Power Splitter with FD-BPM

Zhao Honglin Pan Ji Pan Shangzhen Yang Enze

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

(Received 9 July 1995; revised 26 March 1996)

Abstract After preparing the large cross-section single-mode rib waveguide and it's Y power splitter of GeSi alloy, this paper studies (1) FD-BPM is used to simulate the light propagating in the splitter and the comparison between FFT-BPM and FD-BPM. (2) The simulation of $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ light propagating in the designed 1×4 splitter.

Results show that compating to FFT-BPM, FD-BPM is easier to deal mathmatically and computing speed is faster and not very sensitive to the change of Δz . The simulation of 1×4 power splitter is succeddful. When the single-mode Gauss beam incidents into the splitter, the light propagated in the device according to requirement. At mid-way it splites into 2-beam and into 4-beam finally.

Key words Si light integrate, light splitter, BPM.