

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0314-03

平面光波导高阶模的 FD-TD 法研究*

黄重庆^{1,2} 张国平² 刘靖¹

(¹ 岳阳师范学院物理系, 岳阳 414006)
(² 华中师范大学物理系, 武汉 430079)

摘要 运用时域有限差分(FD-TD)法,对平面光波导高阶模的模场分布进行分析。首先用矢量 FD-TD 法分析了 TE₁ 模的模场分布情况;然后又用标量 FD-TD 法分析了 TE₂ 模的模场分布情况。通过计算机计算所得的模场分布图像与用其他方法所讨论的结果相吻合。

关键词 光波导, 时域有限差分法, 模场分布

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

Research for Higher Order Mode of Planar Optical Waveguide by Using the Finite-Difference Time-Domain (FD-TD) Method

HUANG Chong-qing^{1,2} ZHANG Guo-ping² LIU Jing¹

(¹ Department of Physics, Yueyang Normal University, Yueyang 414006)
(² Department of Physics, Central China Normal University, Wuhan 430079)

Abstract The mode field distributions of higher order mode of planar optical waveguide are analyzed by using the Finite-Difference Time-Domain (FD-TD) method. In this paper, the mode field distributions of TE₁ mode is analysed by using the vector FD-TD method at first; Then the mode field distributions of TE₂ mode is analysed by using the scalar FD-TD method. The figures of mode field distributions calculated by computer are identical to the conclusion discussed by else methods.

Key words optical waveguide; FD-TD method; mode field distribution

1 引言

时域有限差分(FD-TD)法是在时域中求解电磁场的一种数值计算方法,它直接把含时间变量的 Maxwell 旋度方程在 Yee 氏网格空间中转化为差分方程,通过解有限个差分方程来求解各离散点上的电磁场分量。虽然它也是一种近似解法,但随着计算机的高速发展,只要网格步长取得足够小,其计算结果完全可达到精度要求。自从 FD-TD 法创建以来,它主要被应用于研究一般的电磁波对各种物体的相互作用,而用于光波导各性能方面的研究起步较晚。

以前对光波导的模式及光场分布一类问题的研究,多采用射线光学理论和波动光学理论方法^[1-3]

进行分析,且局限于研究结构规则的波导器件。随着光波器件的发展,80 年代以来,出现了各种各样结构复杂的光波导,精确求解其电磁场边值问题能给光波器件性能的优化和设计提供理论基础。由于任意光波导的复杂性,通常难以得到精确的解析解,需采用数值计算方法。时域有限差分(FD-TD)法具有直观、快捷、程序简单、通用、节省内存和计算时间、所得数据和图像物理概念清晰等一系列优点。本文以平面光波导中的 TE₁ 模和 TE₂ 模为例,分别用矢量 FD-TD 法和标量 FD-TD 法分析了平面光波导中高阶模的模场分布情况。

2 理论

2.1 矢量 FD-TD 法分析

平面波导结构如图 1 所示, n_1, n_2, n_3 分别为

*教育部高等学校骨干教师资助计划(GG-140-10511-1007)资助课题。

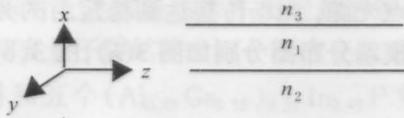


图1 平面波导结构示意图

Fig. 1 Sketch map of planar waveguide

薄膜层、衬底、覆盖层的折射率, x 方向为折射率变化方向, z 方向为光波的传播方向, 因光在 y 方向不受限制, 相应的光场只是 x 和 z 的函数, 三维问题可简化为二维问题来处理。所以对平面波导可用较简单的二维 FD-TD 法分析。下面以 TE 波为例, 在无源区域, TE 波的麦克斯韦方程可简化为:

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (3)$$

其中 ϵ 为计算区域的介电常数, μ 为磁导率。

根据各电磁场分量在 Yee 氏网格单元^[4]中的分布情况, 应用二维 FD-TD 法可将方程(1)转换成如下的二维时域有限差分格式

$$E_y^{N+1}(i, k) = E_y^N(i, k) + \left[\frac{H_x^{N+1/2}(i, k+1) - H_x^{N+1/2}(i, k-1)}{2\Delta z} - \frac{H_z^{N+1/2}(i+1, k) - H_z^{N+1/2}(i-1, k)}{2\Delta x} \right] \Delta t / \epsilon$$

式中采用符号 $E^N(i, k) = E(i\Delta x, k\Delta z, N\Delta t)$ 代表场分量 $E(x, z, t)$, 其中 Δx 和 Δz 分别为沿 x 和 z 方向的空间步长, Δt 为时间步长。方程(2), (3)也可用类似的方式变为相应的差分格式。

为了保证二维 FD-TD 法的稳定性^[5], 对时间步长 Δt 的选取应由下式决定:

$$\Delta t \leq \frac{1}{v_{\max}} \left[\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2} \right]^{-1/2}$$

v_{\max} 为波预期的最大速度, 这个稳定性条件也实用于下面的标量分析。

2.2 标量 FD-TD 法分析

由于 TE 波中电场分量只有 E_y , 其他各磁场分量均可用 E_y 表示, 故用标量 FD-TD 法分析更为简便, 对 E_y 其标量波动方程为:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = 0$$

根据 FD-TD 法原理同样可得其对应的差分方程为:

$$E_y^{N+1}(i, k) = P(i) [E_y^N(i-1, k) +$$

$$E_y^N(i+1, k) + E_y^N(i, k-1) + E_y^N(i, k+1) - 4E_y^N(i, k)] + 2E_y^N(i, k) - E_y^{N-1}(i, k)$$

其中

$$P(i) = \frac{\Delta t^2}{\mu_0 \epsilon_0 \Delta s^2 n^2(i)}$$

由于光场的分布空间是无限的, 而任何计算机的存储空间都是有限的, 所以要用有限的网格空间模拟无限的光场分布区域必须在某处截断网格空间, 这可通过把吸收边界条件^[6]应用于网格边界来实现。

3 计算结果与分析

3.1 矢量 FD-TD 法分析结果

以 TE₁ 模为例, 其参数为 $n_1 = 3.6$, $n_2 = n_3 = 3.52$, 波导薄膜层厚度为 $h = 1 \mu\text{m}$, $\lambda_0 = 1.33 \mu\text{m}$ 。计算时取 $\Delta x = \Delta z = 2v_{\max} \Delta t = 0.05\lambda_{\min}$, 所用激励为点光源, 光场传播达到稳定后的光场分布图及稳态模场分布图分别如图 2 (a), 图 2(b)所示。

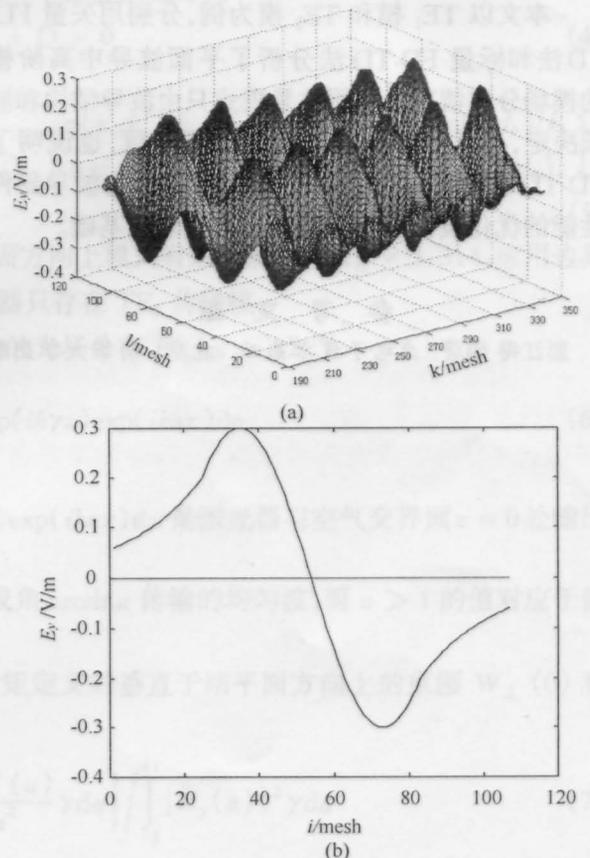


图2 平面波导 TE₁ 模的三维(a)和二维(b)模场分布
Fig. 2 The three-dimensional (a) and the two-dimensional (b) mode field distributions of TE₁ mode of plane waveguide

3.2 标量 FD-TD 法分析结果

以 TE₂ 模为例,其参数为 $n_1 = 3.3, n_2 = n_3 = 3.2$,波导薄膜层厚度为 $h = 2 \mu\text{m}, \lambda_0 = 1.4 \mu\text{m}$ 。所

用激励为点光源,光场传播达到稳定后的光场分布图及稳态模场分布图分别如图 3(a),图 3(b)所示。

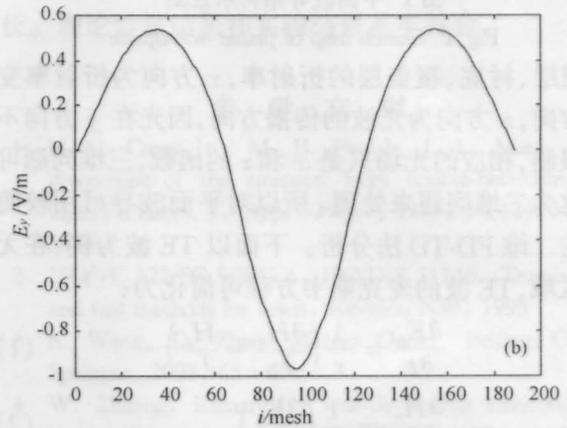
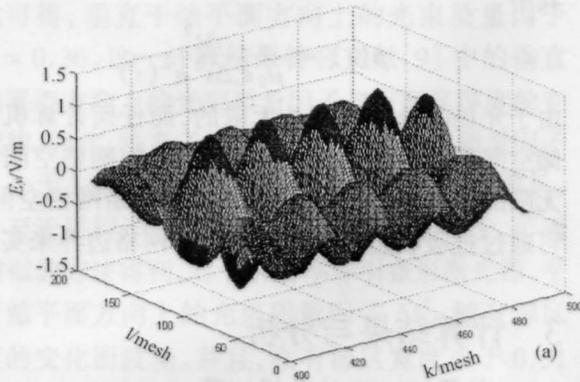


图 3 平面波导 TE₂ 模的三维(a)和二维(b)模场分布

Fig.3 The three-dimensional (a) and the two-dimensional (b) mode field distributions of TE₂ mode of plane waveguide

4 结 论

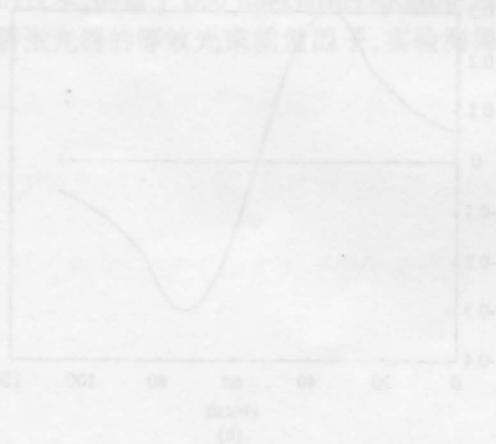
本文以 TE₁ 模和 TE₂ 模为例,分别用矢量 FD-TD法和标量 FD-TD法分析了平面波导中高阶模的模场分布情况。说明波导模式只由波导结构和波长决定,与其他方法讨论的结果相一致,也说明了 FD-TD法用于分析波导导模的有效性,为波导器件性能的优化设计以及参数分析提供理论基础。

参 考 文 献

- 1 彭江得 编著. 光电子技术基础. 北京: 清华大学出版

- 社,1999. 283~305

- 2 明海,张国平,谢建平 编著. 光电子技术. 地点: 中国科学技术大学出版社,1998. 6~46
- 3 徐保强,杨秀峰,夏秀兰 等编著. 光纤通信及网络技术. 北京: 北京航空航天大学出版社,1999. 6~18
- 4 居继龙,李增瑞 等. 两种新的时域有限差分算法. 电子学报,1998,26(6):31~32
- 5 A. Taflove, M. E. Brodwin. Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations. *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, 1975, MTT-23:623~630
- 6 葛俊祥,李玉星. 广义正交坐标系下 FD-TD算法的吸收边界条件. 电子学报,1998, 26(3):115~116



(a) The three-dimensional (a) and the two-dimensional (b) mode field distributions of TE₂ mode of plane waveguide

图 3(a) 和 3(b) 展示了平面波导 TE₂ 模的模场分布。图 3(a) 是三维模场分布图，显示了光场在波导横截面上的分布情况。图 3(b) 是二维模场分布图，显示了光场沿波导传播方向的分布情况。从图中可以看出，光场在波导中呈现出明显的驻波特性，这是由于波导的边界条件导致的。图 3(a) 中的三维分布图显示了光场在波导横截面上的分布，其中心区域的光场强度最高，而边缘区域的光场强度最低。图 3(b) 中的二维分布图显示了光场沿波导传播方向的分布，其分布呈现出明显的周期性，这是由于波导的边界条件导致的。图 3(a) 和 3(b) 的分布图分别如图 3(a) 和 3(b) 所示。