

条形波导的三维标量FDTD法分析*

陈晓文, 刘叶新, 吴添洪, 林位株

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室//理工学院, 广东 广州510275)

摘要: 发展了一种实用的对条形结构波导中光的传输特性进行模拟计算的三维标量时域有限差分(FDTD)数值计算方法, 并对在电吸收调制器条形波导中的光场分布进行数值模拟计算, 得到了在条形波导中光传输方向上不同横截面上的光场分布形式, 这些光场分布是由波导中不同模式场叠加形成的, 反映了波导中多模干涉的现象。数值模拟计算的结果与实验测试结果相一致, 证明了这种三维标量FDTD法应用于条形光波导结构分析的有效性。此方法具有掌握容易, 计算分析简便等优点, 适用于条形结构波导的设计、模拟和特性分析。

关键词: 条形波导; 时域有限差分法(FDTD); 波导分析;

中图分类号: TN252 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2005)03-0119-03

条形波导是许多光电子器件中的重要结构。为了理解和掌握光波在条形波导中的行为, 人们已开展过许多的理论研究。由于这类结构的复杂性, 条形波导的严格分析是十分困难的, 一般只能在一些近似条件下, 求得它的近似解^[1]。随着计算机在现代社会中越来越广泛深入的应用, 人们可以通过数值方法来对光波导进行模拟计算, 从而得到光在波导中的传输特性。这些数值计算方法的采用不但能处理复杂结构的光波导问题, 而且能得到足够精度的模拟分析结果, 极大地促进了波导技术的发展。

时域有限差分(FDTD)法是目前常用的用于计算电磁场问题的数值计算方法^[2], 由于其具有的一系列特点, 特别适合于光波导的模拟分析。本文将三维标量FDTD方法应用于条形波导中光波的传输模拟计算上, 借助计算机编程进行数值计算求解, 得到了光在条形波导中传输的光场分布情况, 并与实验得到的现象相一致, 证明了这种方法在条形结构波导模拟分析中的实用有效性。

1 标量FDTD数值方法

设条形波导的横截面上沿折射率变化方向为 x 方向 y 方向与其垂直, 波导纵向为 z 方向。因此, 光在其横截面的 x , y 方向上都受到约束, 并沿 z 方向进行传输, 所以分析时必须运用三维FDTD方法对其进行数值计算。

根据条形波导理论, 在弱导近似条件下, 波导中的导波模式可分成横向分量为 E_y 、 H_x 的 E_{mn}^y 模式和横向分量为 H_y 、 E_x 的 E_{mn}^x 模式。在 E_{mn}^x 模式中, 各电磁场分量均可用 E_x 表示, 所以只需求出

E_x , 其余场量也能由此而得出, 这样用标量FDTD法求解更为简单。以下就以 E_{mn}^x 模式中的 E_x 分量来求解光在条形波导中传输的场值分布。

在无源区域, E_x 分量满足三维标量波动方程

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] E_x - \mu_0 \epsilon_0 n^2 \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

按照FDTD法的Yee氏网格模型及其差分离散方法^[3], 用符号 $E^n(i, j, k) = E(x, y, z, t)$ 代表场分量 $E(x, y, z, t)$, 其中, Δx 、 Δy 、 Δz 分别为 x 、 y 、 z 方向的网格空间步长, Δt 为时间步长, i 、 j 、 k 、 n 分别为对应步长个数。采用中心差分离散后, 可得到上述波动方程的差分格式为

$$\begin{aligned} E_x^{n+1}(i, j, k) = & \left[\frac{c\Delta t}{n(i, j, k)\Delta x} \right]^2 \times \\ & [E_x^n(i+1, j, k) + E_x^n(i-1, j, k) - 2E_x^n(i, j, k)] + \\ & \left[\frac{c\Delta t}{n(i, j, k)\Delta y} \right]^2 [E_x^n(i, j+1, k) + \\ & E_x^n(i, j-1, k) - 2E_x^n(i, j, k)] + \\ & \left[\frac{c\Delta t}{n(i, j, k)\Delta z} \right]^2 [E_x^n(i, j, k+1) + E_x^n(i, j, k-1) - \\ & 2E_x^n(i, j, k)] + 2E_x^n(i, j, k) - E_x^{n-1}(i, j, k) \quad (2) \end{aligned}$$

FDTD的差分方法中, 为避免被计算的场的数值随计算步数的增加而无限增大, 空间和时间网格的划分必须满足FDTD的稳定性条件。按照FDTD法的Courant稳定性条件^[4], 在三维情况下时间步长和空间步长必须满足以下条件:

* 收稿日期: 2005-02-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60178020, 10274107); 广东省自然科学基金资助项目(011204, 2002B11601)

作者简介: 陈晓文(1979年生), 男, 硕士研究生; 通讯联系人: 林位株; E-mail: stslwz@zsu.edu.cn

$$c\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (3)$$

同时, 为了减小由于差分离散而引起的数值色散^[5], 空间步长应满足 $\lambda_{\min} \geq 10\Delta$, $\Delta = \min(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$, $\lambda_{\min}$ 是被研究媒质空间的最小波长值 (对应最高频率)。

由于计算机存储量有限, 计算区域要人为地截断。截断界面的电磁场满足一定的条件, 使截断界面不产生反射, 截断界面内部的场不产生畸变, 这就是 FDTD 的吸收边界条件。吸收边界条件主要有两类: 一是通过波动方程的因子分解而得到单行波方程, 如应用最广泛的 Mur 氏吸收边界条件^[6], 二是在截断界面设计一定厚度的吸收层, 以吸收电磁波, 称为完全匹配层 (PML) 吸收边界条件^[7]。虽然 PML 边界条件比 Mur 氏边界条件能更好地防止在边界上的反射, 但是它应用起来较复杂, 且占用较多内存资源。本文在网格空间的五个边界面上采用 Mur 氏二阶吸收边界条件, 不但简单易用, 而且可以得到足够的计算精度。

对于 $x = i_0 \Delta x$ 的边界面, 其三维 Mur 氏二阶吸收边界条件为

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{c}{2} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{c}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] E_x = 0 \quad (4)$$

其差分格式为

$$\begin{aligned} E_x^{n+1}(i_0, j, k) = & -E_x^{n-1}(i_0+1, j, k) + \frac{c\Delta t - \Delta x}{c\Delta t + \Delta x} \times \\ & [E_x^{n+1}(i_0+1, j, k) + E_x^{n-1}(i_0, j, k)] + \\ & \frac{2\Delta x}{c\Delta t + \Delta x} [E_x^n(i_0, j, k) + E_x^n(i_0+1, j, k)] + \\ & \frac{(c\Delta t)^2 \Delta x}{2\Delta y^2 (c\Delta t + \Delta x)} [E_x^n(i_0, j+1, k) - \\ & 2E_x^n(i_0, j, k) + E_x^n(i_0, j-1, k) + E_x^n(i_0+1, j+1, k) - \\ & 2E_x^n(i_0+1, j, k) + E_x^n(i_0+1, j-1, k)] + \\ & \frac{(c\Delta t)^2 \Delta x}{2\Delta z^2 (c\Delta t + \Delta x)} [E_x^n(i_0, j, k+1) - 2E_x^n(i_0, j, k) + \\ & E_x^n(i_0, j, k-1) + E_x^n(i_0+1, j, k+1) - \\ & 2E_x^n(i_0+1, j, k) + E_x^n(i_0+1, j, k-1)] \quad (5) \end{aligned}$$

类似地, 其他的边界也可通过相同的方法得到其差分方程。

对于计算空间网格边界的八条棱边, 可采用 Mur 氏一阶吸收边界进行处理。如对于棱边 (i_0, j_0, k) ($k_0 \leq k \leq k_m$), 设 $\Delta x = \Delta y = \delta$ 其差分式可表示为

$$E_x^{n+1}(i_0, j_0, k) = E_x^n(i_0+1, j_0+1, k) + \frac{c\Delta t - \sqrt{2}\delta}{c\Delta t + \sqrt{2}\delta} \times$$

$$[E_x^{n+1}(i_0+1, j_0+1, k) - E_x^n(i_0, j_0, k)] \quad (6)$$

为了计算波导中的光波传播情况, 必须设置一个能激励起波导中模式的激励源。由激励源产生的电磁场随时间步增加在网格空间中传播, 经过一段时间的传播后达到稳定。激励源随时间的变化主要有两类, 一类是时谐波源, 另一类是高斯脉冲源。本文采用具有高斯空间分布的时谐激励源来模拟实际实验中的单一频率激光输入, 可以激发出条形波导中的多种模式。在条形波导的输入端面其表达式为

$$G(i, j, 1, n) = \exp[-(2i\Delta x/W_x)^2] \times \exp[-(2j\Delta y/W_y)^2] \sin(\omega\Delta t) \quad (7)$$

在 (7) 式中, $W_x (= T/2)$ 和 $W_y (= W/2)$ 分别取为芯区的半厚度和半宽度, ω 为输入激光的角频率。

2 数值计算结果和分析

本文以一个电吸收光调制器中的条形波导为模拟分析对象。其波导参数为: 芯层折射率 $n_1 = 3.53$, 上下包层折射率 $n_2 = 3.38$, 波导芯层厚度为 $0.2 \mu\text{m}$, 上下包层均为 $0.9 \mu\text{m}$, 条形波导宽度为 $8 \mu\text{m}$ 。对于两层边界的计算点其结构参数的取值为两层结构参数的平均值。根据 FDTD 法差分应满足的各项条件, 同时考虑计算存储量和运算时间, 时间步长与空间步长取 $\Delta x = \Delta y = 2c\Delta t = 0.05 \mu\text{m}$, $\Delta z = 0.5 \mu\text{m}$ 。激励源在条形波导端面中心入射, 产生的电磁场随时间步的增加在网格空间传播, 经过一段时间的传播后达到稳定, 则此时在条形波导中各横截面场值的分布情况可由计算机编程计算得出, 结果如下图 1 所示。

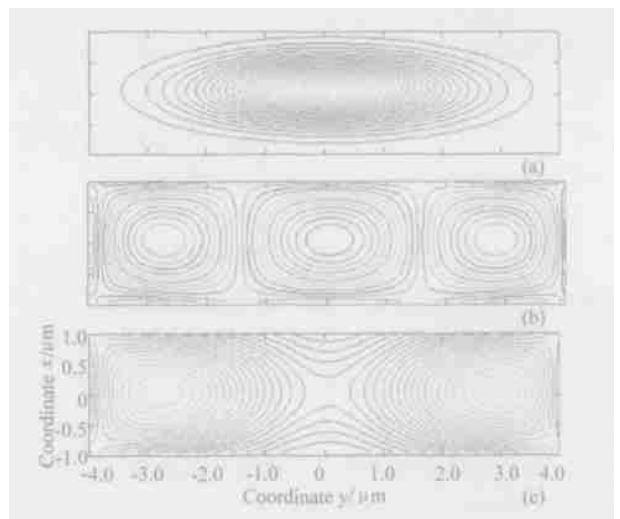


图 1 条形波导中不同传输距离横截面光的场值等值线分布

Fig. 1 The isolines of optical field distribution in different cross section of channel waveguide

图 1 分别给出了在条形波导中不同传输距离的横截面上的典型的场值分布情况。(a) 为在输入端光场的分布, (b) 和 (c) 分别为光在传输 40 μm 和 49 μm 横截面时光的场值等值线分布图。激励源激发起波导中的多种模式, 在光传输方向上的不同横截面上, 各种不同模式的叠加形成光场的不同分布形式, 且随波导长度周期性出现, 反映了波导中光波场多模干涉的现象。通过这些场值分布图可以直观地了解光在条形波导中的传输情况。我们以具有以上参数的电吸收调制器条形波导为对象进行了实验, 在波导的输出端面观测光场情况, 显微图像如图 2 所示。实验结果与图 1 (b) 所示的模拟结果相一致。

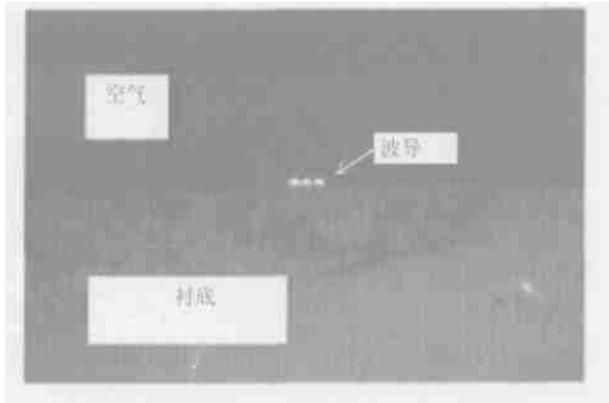


图 2 电吸收调制器条形波导输出端面光波场分布显微 CCD 图像

Fig. 2 The microscope CCD picture of the optical field distribution on the output interface of channel waveguide in the EA modulator

3 结 论

本文将三维标量 FDTD 数值计算方法应用于条形光波导结构的模拟计算中, 给出了在条形光波导中进行 FDTD 法模拟计算的设定方法, 并编制程序, 对在条形波导中的光场分布进行数值计算, 模拟结果与实验结果相一致。这种方法与条形波导理论中的近似解析法相比具有计算分析简单, 结果形象直观等优点, 同时与现有的波导模拟流行软件相比具有掌握容易, 波导参数设定清晰简便等优点。

参考文献:

[1] 李玉权, 崔敏. 光波导理论与技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002: 82~ 87.
[2] TELFOVE A. Computational electrodynamics: The finite difference time domain method [M]. Norwood, MA: Artech House, 1995.
[3] YEE K S. Numerical solution of initial value problems involving Maxwell's equation in isotropic media[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1966, 14(5): 302~ 307.
[4] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 26~ 27.
[5] 高本庆. 时域有限差分法 FDTD Method[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 29~ 32
[6] MUR G. Absorbing boundary conditions for the finite difference approximation of the time domain electromagnetic field equations[J]. IEEE Trans EMC, 1981, 23(4): 377— 382.
[7] BERENGER J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetics waves[J]. J Computational Physics, 1994, 114(1): 185— 200.

Analysis of Stripe Waveguide with the Three Dimensional Scalar Finite Difference Time Domain Method

CHEN Xiao wen, LIU Ye xin, WU Tian hong, LIN Wei zhu

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: A practical method for simulating and calculating the transmission characteristics of optical wave in the channel waveguide is developed based on the 3-D scalar finite difference time domain (FDTD) technique, and applied to numerical simulation and calculation of the field distributions in the channel waveguide of EA modulator. The numerical results in terms of field distributions represent the multimode interference in the cross section of the channel waveguide. The fact that the calculated results are in good agreement with the experimental observations indicates that this method is applicable for the analysis of optical wave in a channel optical waveguide structure. This method can be easily applied to design, simulation and characteristics analysis of the channel waveguide.

Key words: stripe waveguide; finite difference time domain method (FDTD); analysis of waveguide