

单向激励源在 TD-BPM 中的应用*

周勤存 梅维泉 陈学文 何赛灵

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 光及电磁波研究中心, 杭州 310027)

摘要: 把单向激励源应用到隐式时域光束传播方法(TD-BPM)中, 结合交替方向隐式方法(ADIM)及 Grank-Nichoson 差分原理, 给出了单向激励源在隐式 TD-BPM 中的具体实现方法. 通过该方法可以方便地得到各种有反射结构的反射场和总场, 在模拟计算不连续界面的反射、透射问题中有重要的作用. 通过几个基本问题得到了该方法的各种计算结果, 验证了该方法的有效性.

关键词: 时域光束传播方法; 交替方向隐式方法; 单向激励源; 反射; 数值计算

EEACC: 4310; 4140

中图分类号: TN814

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)04-0472-05

1 引言

在集成光波导器件及半导体器件中, 对不连续界面的反射、透射现象的研究是一个常见的问题, 比如光波导输出端面的反射、激光器输出端面的反射、不同波导在连接处的反射等. 模拟计算不连续界面的反射是一个重要的问题, 为了解决这一问题, 提出了各种计算方法, 比如双向光束传播方法(Bidirectional-BPM)^[1]、双向抛物型方程方法(Bidirectional parabolic equation method)^[2]、Póde 近似方法^[3], 以及时域光束传播方法(TD-BPM)^[4-6]等. TD-BPM 方法的实现简单直观, 应用灵活有效, 可以实现对各种角度的反射、衍射的模拟. 在 TD-BPM 方法中, 实现反射场和入射场的分离是模拟计算界面反射问题的关键, 在文献[6]中, 给出了实现单向激励源的显式 TD-BPM 方法. 本文把单向激励源应用到隐式 TD-BPM 方法中, 结合交替方向隐式方法(ADIM)^[7]及 Grank-Nichoson 差分原理, 给出了单向激励源在隐式 TD-BPM 中的具体实现方法. 通过该方法可以方便地实现对各种不连续界面的模拟计算. 本文给出了 TD-BPM 方法的基本原理、单向激励源的实现及各种计算实例.

2 TD-BPM 方法及其数值求解

在无色散的介质中, 由 Maxwell 方程组可以得到如下公式:

$$\nabla \times \nabla \times \bar{E}(\bar{r}, t) + \frac{\epsilon}{c^2} \times \frac{\partial^2 \bar{E}(\bar{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

其中 $\epsilon = \epsilon(\bar{r})$ 为相对介电常数, $\epsilon(\bar{r}) = n^2(\bar{r})$; c 为真空中的光速. 考虑到激励光源为近似单频光, 主要频率成分集中在角频率 ω (称为参考角频率) 附近, $\bar{E}(\bar{r}, t)$ 可以写成如下形式:

$$\bar{E}(\bar{r}, t) = \bar{\Psi}(\bar{r}, t) e^{-j\omega t} \quad (2)$$

把(2)式代入(1)式可得如下方程:

$$- 2j \frac{\omega \epsilon}{c^2} \times \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial t} + \frac{\epsilon}{c^2} \times \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial t^2} = - \nabla \times \nabla \times \bar{\Psi} + \frac{\omega^2 \epsilon \bar{\Psi}}{c^2} \quad (3)$$

在 TD-BPM 方法中, 假设 $\bar{\Psi}(\bar{r}, t)$ 随 t 是缓变的, 即

$$\left| - 2j \frac{\omega \epsilon}{c^2} \times \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial t} \right| \gg \left| \frac{\epsilon}{c^2} \times \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial t^2} \right| \quad (4)$$

所以可以忽略关系式(3)中时间的二次偏导. 从而得到如下公式:

$$- 2j \frac{\omega \epsilon}{c^2} \times \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial t} = - \nabla \times \nabla \times \bar{\Psi} + \frac{\omega^2 \epsilon \bar{\Psi}}{c^2} \quad (5)$$

* 浙江省科技计划资助项目(No. 001101027)

周勤存 男, 1977 年出生, 博士研究生, 主要从事集成波分复用器件的设计、模拟和制作.

2003-03-15 收到, 2003-05-28 定稿

在二维情况下, 考虑 TE 偏振光, 我们可以得到如下方程:

$$\sigma \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \gamma E \quad (6)$$

其中 $\sigma = -2j \frac{\omega n^2}{c}$; $\gamma = k_0^2 n^2$.

为了书写方便, 记 $E_{i,j}^l = E(i\Delta x, j\Delta y, l\Delta t)$. 采用 ADIM (Alternating-direction implicit method) 方法和 Crank-Nicholson 差分原理, 可以分两步得到方程 (6) 的数值解:

$$A E_{i,j}^{l+1/2} + B E_{i,j}^{l+1/2} + C E_{i+1,j}^{l+1/2} = D \quad (7)$$

$$a E_{i,j-1}^{l+1} + b E_{i,j}^{l+1} + c E_{i,j+1}^{l+1} = d \quad (8)$$

其中

$$\left\{ \begin{array}{l} A = C = 1 \\ B = -2 + \frac{\gamma_{i,j}}{2} \Delta x^2 - \frac{2\sigma_{i,j}}{\Delta t} \Delta x^2 \\ D = D_1 E_{i,j-1}^l + D_2 E_{i,j}^l + D_3 E_{i,j+1}^l \\ D_1 = D_3 = -\frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} \\ D_2 = \frac{2\Delta x^2}{\Delta y^2} - \frac{\gamma_{i,j}}{2} \Delta x^2 - \frac{2\sigma_{i,j}}{\Delta t} \Delta x^2 \\ a = c = 1 \\ b = -2 + \frac{\gamma_{i,j}}{2} \Delta y^2 - \frac{2\sigma_{i,j}}{\Delta t} \Delta y^2 \\ d = d_1 E_{i-1,j}^{l+1/2} + d_2 E_{i,j}^{l+1/2} + d_3 E_{i+1,j}^{l+1/2} \\ d_1 = d_3 = -\frac{\Delta y^2}{\Delta x^2} \\ d_2 = \frac{2\Delta y^2}{\Delta x^2} - \frac{\gamma_{i,j}}{2} \Delta y^2 - \frac{2\sigma_{i,j}}{\Delta t} \Delta y^2 \end{array} \right. \quad (9)$$

根据具体的问题, 在求解方程 (7), (8) 的过程中, 适当的给定 $t=0$ 时的初始场分布, 同时给定激励源的具体形式, 就可以按照时间的迭代来求得任意时刻的场分布. 在数值求解过程中, 采用完美匹配层 (PML) 吸收边界^[8-11]来处理边界条件以便进行有效的边界处理.

3 单向激励源在不连续界面中的处理

在 TD-BPM 方法中, 由于采用包络缓变近似 (SVEA), 即 $\bar{\psi}(r, t)$ 随 t 是缓变的, 所以在模拟计算中, 我们一般采用连续波作为激励源. 这种情况下, 在有反射结构的模拟中, 反射场在激励源位置时, 我们有必要对反射场和入射场进行分开处理, 否则不能得到反射场的大小. 下面, 将给出采用单向激励源

来解决这一问题的具体实现方法.

在单向激励源方法中, 把整个计算区域分为反射场区 (reflected field area) 和总场区 (total field area), 如图 1(a), $y < y_0$ ($j < j_0$) 的区域为反射场区, 在反射场区内计算得到的是反射场; 在 $y \geq y_0$ ($j \geq j_0$) 的区域为总场区, 在总场区内计算得到的是总场, 即反射场和入射场之和; 入射源 $E^{in}(x, y = y_0, t)$ 置于 $y = y_0$ ($j = j_0$) 的平面上, 在该位置上的总场为 $E^T(x, y = y_0, t) = E^{in}(x, y = y_0, t) + E^R(x, y = y_0, t)$.

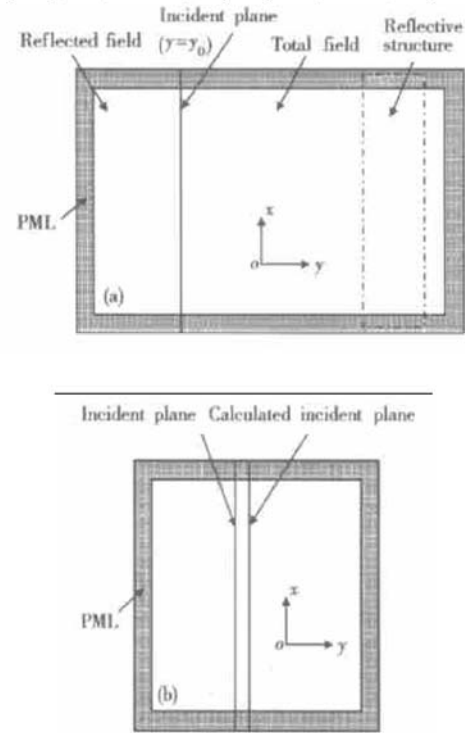


图 1 (a) 单向激励源方法应用于 TD-BPM 的基本原理; (b) 无反射结构计算入射场示意图

Fig. 1 (a) One-way excitation used in the TD-BPM; (b) Reflectionless structure for calculating the incident field

整个计算过程要分两步完成, 首先去除模拟区域中的反射结构, 求得在位置 $y = y_0 + \Delta y$ 处的入射场 $E^{in}(x, y = y_0 + \Delta y, t)$. 在求解 $E^{in}(x, y = y_0 + \Delta y, t)$ 的过程中, 可以适当减小整个计算区域, 减少计算时间, 如图 1(b) 所示; 然后根据 $E^{in}(x, y = y_0, t)$ 及求得的 $E^{in}(x, y = y_0 + \Delta y, t)$, 对公式 (9) 中的系数在 $j = j_0$ 及 $j = j_0 - 1$ 处分别作如下修改:

在 $j = j_0 - 1$ 处, (9), (10) 式中的 D 和 d 分别改写为:

$$D = D_1 E_{i,j-1}^l + D_2 E_{i,j}^l + D_3 (E_{i,j+1}^l - E_{i,j+1}^l) \quad (11)$$

$$d = d_1 E_{i-1,j}^{l+1/2} + d_2 E_{i,j}^{l+1/2} + d_3 E_{i+1,j}^{l+1/2} + c E_{i,j+1}^{in,l+1} \quad (12)$$

在 $j = j_0$ 处, (9), (10) 式中的 D 和 d 分别改写为:

$$D = D_1 E_{i,j-1}^l + D_2 (E_{i,j}^l - E_{i,j}^{in,l}) + D_3 (E_{i,j+1}^l - E_{i,j+1}^{in,l}) + (A E_{i-1,j}^{in,l} + B E_{i,j}^{in,l} + C E_{i+1,j}^{in,l}) \quad (13)$$

$$d = d_1 (E_{i-1,j}^{l+1/2} - E_{i-1,j}^{in,l}) + d_2 (E_{i,j}^{l+1/2} - E_{i,j}^{in,l}) + d_3 (E_{i+1,j}^{l+1/2} - E_{i+1,j}^{in,l}) + (b E_{i,j}^{in,l+1} + c E_{i,j+1}^{in,l+1}) \quad (14)$$

通过以上对反射场区域和总场区域连接处的处理, 我们就可以方便地得到在反射场区域的反射场和总场区域的总场。

4 数值模拟结果

在以下的数值模拟中, 采用的激励源的一般形式如下:

$$E(x, y = y_0, t) = E(x, y = y_0) A(t) e^{-i\omega t} \quad (15)$$

其中 $E(x, y = y_0)$ 为入射场平面上的源场的横向场分布, $A(t)$ 为一开关函数, 其表达式如下:

$$A(t) = \begin{cases} e^{-\frac{(t-2\Delta\tau)^2}{\Delta\tau^2}} & t < 2\Delta\tau \\ 1 & t \geq 2\Delta\tau \end{cases} \quad (16)$$

4.1 平面波在均匀介质中的传播

首先考察平面波在均匀介质中的传播, 这是一种没有反射的理想情况. 计算区域为 $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$, 介质折射率为 1.46, 入射波中心波长为 $1.55\mu\text{m}$. $\Delta x = 0.05\mu\text{m}$, $\Delta y = 0.025\mu\text{m}$, $\Delta f = 2\text{fs}$; $E(x, y = y_0) = 1$, $\Delta\tau = 40\text{fs}$. 图 2 是在 $t = 500\text{fs}$ 时计算得到的结果. 可以看出, 此方法得到的反射系数 $\left| \frac{E^R}{E^{in}} \right| < 10^{-3}$, 对于反射场出现纹波现象的原因, 我们认为一部分是由于 PML 边界的微小反射引起的, 同时数值计算的精度也是原因之一.

4.2 平面波垂直入射界面反射率的验算

平面波从折射率 $n_1 = 1.46$ 的均匀介质垂直入射到折射率 n_2 的均匀介质, 在两种介质的界面上发生反射, 反射率可以由如下解析公式计算得到:

$$R = \left[\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right]^2$$

采用单向激励源的 TD-BPM 方法得到的结果如图 3 所示, 可以看出, 由此方法得到的结果和理论值是

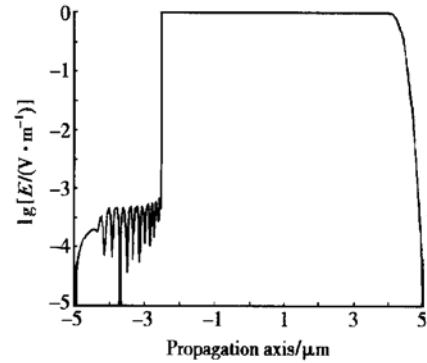


图 2 平面波在均匀介质中的传播

Fig. 2 Plane wave propagation in a homogeneous medium

吻合的.

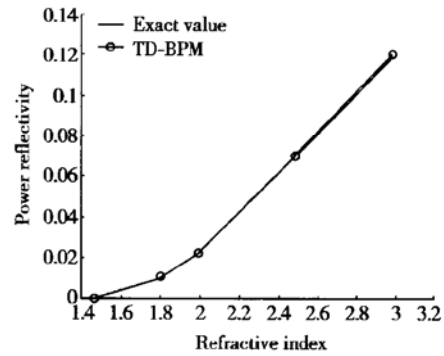


图 3 TE 偏振光垂直入射不连续界面的反射率比较

Fig. 3 Power reflectivity for the TE-polarized plane wave incident normally on an interface

4.3 光波导在输出端面上的基模反射率

计算波导在输出端面上的模式反射率, 是设计集成光器件中经常要遇到的一个重要问题, 比如半导体激光器输出端面上的反射问题等. 如图 4(a) 所示, 一输出光波导的输出端面与折射率为 n_0 的均匀介质比邻, 其中 $n_{co} = 3.6$, $n_{cl} = 3.24$, $n_0 = 1$, $\lambda_0 = 0.86\mu\text{m}$, 波导宽度 W 在 $0.05\mu\text{m}$ 到 $1\mu\text{m}$ 之间变化; 在激励源表达式中 $E(x, y = y_0)$ 为波导的基模形式, $\Delta\tau = 40\text{fs}$. 在这里, 采用单向激励源的 TD-BPM 方法计算波导 TE 偏振光的基模在输出端面上的反射率, 计算基模反射率的公式如下:

$$R = \left| \frac{\int_{\text{out}} E_m^* dx}{\int_{\text{in}} E_m^* dx} \right|^2 \quad (18)$$

其中 E_m 为波导基模的场分布; E_{in} , E_{out} 为输入输出场分布.

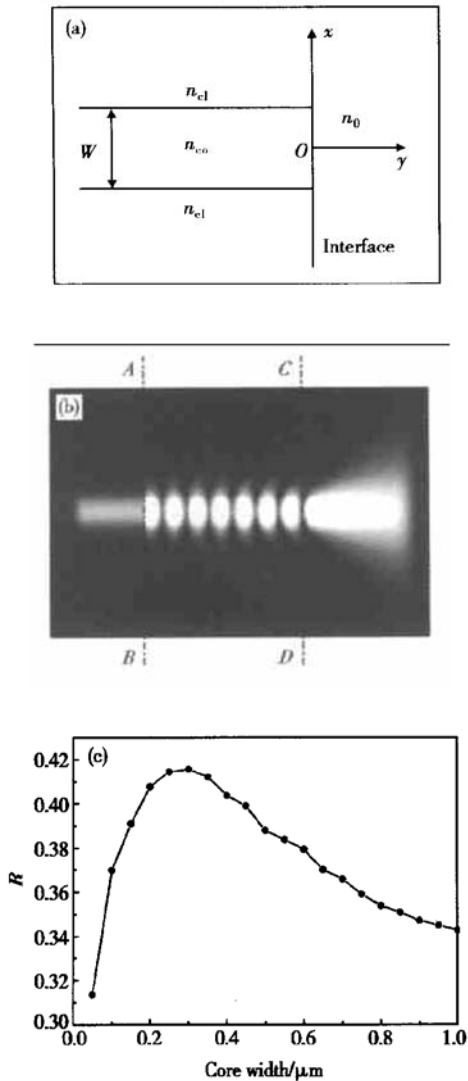


图 4 (a) 输出波导到均匀介质的不连续结构; (b) 稳态场分布的灰度图; (c) 基模反射率随波导宽度的变化关系

Fig. 4 (a) A waveguide terminated with a homogeneous half-space; (b) Density plot for the distribution of the stabilized field; (c) Reflectivity of the fundamental mode TE wave as a function of the core width, calculated by the TD-BPM with one-way excitation

图 4(b) 是 $W = 0.3 \mu\text{m}$ 时计算得到的稳态场分布的灰度图, 可以清楚地看到反射场 (AB 面左侧区域)、透射场 (CD 面右侧区域) 及入射场和反射场形成的驻波 (AB 面和 CD 面之间的区域)。图 4(c) 是基模反射率随波导宽度的变化关系, 这一结果和文献[3]的结果是吻合的。

5 结论

把单向激励源应用到隐式时域光束传播方法中, 使该方法应用到集成光波导器件及半导体器件中不连续界面的反射、透射的模拟计算中, 可以有效地得到不连续界面的反射和透射。

参考文献

- [1] Kaczmarek P, Lagasse P E. Bidirectional beam propagation method. *Electron Lett*, 1988, 24(11): 675
- [2] Yu Chunlin, Yevick David. Application of the bi-directional parabolic equation method to optical waveguide facets. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(7): 1448
- [3] Chiou Yih-Peng, Chang Huang-Chun. Analysis of optical waveguide discontinuities using the Póde approximations. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1997, 9(7): 964
- [4] Jin G H, Harari J, Vilcot J P, et al. An improvement time-domain beam propagation method for integrated optics components. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1997, 9(3): 348
- [5] Liu Pao-Lo, Zhao Qida, Choa Fow-San. Slow-wave finite-difference beam propagation method. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1995, 7(8): 890
- [6] Ma Fred. Slowly varying envelope simulation of optical waves in time domain with transparent and absorbing boundary condition. *J Lightwave Technol*, 1997, 15(10): 1974
- [7] Hsueh Yu-Li, Yang Ming-Chuan, Chang Hung-Chun, et al. Three-dimensional noniterative full-vectorial beam propagation method based on the alternating direction implicit method. *J Lightwave Technol*, 1999, 17(11): 2389
- [8] Huang W P, Xu C L, Lui W, et al. The perfectly matched layer (PML) boundary condition for the beam propagation method. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1996, 8(5): 649
- [9] Rappaport C M. Perfectly matched absorbing boundary conditions based on anisotropic lossy mapping of space. *IEEE Microwave Guided Wave Lett*, 1995, 5(3): 90
- [10] Zhang Xiaofeng, Yu Jinzhong, Wang Qiming, et al. Beam propagation method and its application in SOI structures. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(2): 169 (in Chinese) [张小峰, 余金中, 王启明, 等. BPM 方法在 SOI 结构中的应用. *半导体学报*, 2002, 23(2): 169]
- [11] Lin Qingchun, Xiao Yueyu, He Sailing. PML boundary treatment method based on wide-angle finite-difference beam propagation method. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(3): 349 (in Chinese) [林青春, 肖悦娱, 何赛灵. 基于广角 FD-BPM 的 PML 的边界处理方法. *光子学报*, 2002, 31(3): 349]

One-Way Excitation Source for TD-BPM*

Zhou Qincun, Mei Weiquan, Chen Xuewen and He Sailing

(Center for Optical Electromagnetic Research, State Key Laboratory of Modern Optical Instrument,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Combined with the alternating-direction implicit method and the Crank-Nicholson algorithm, the one-way excitation source is introduced into the implicit time-domain beam propagation method (TD-BPM). With the one-way excitation, the TD-BPM can be used to analyze and simulate the reflection and transmission at an interface of a guided-wave optoelectronic device. Examples are given to show the effectiveness of the present method.

Key words: TD-BPM; ADIM; one-way excitation; reflection; numerical method

EEACC: 4310; 4140

Article ID: 0253-4177(2004)04-0472-05

* Project supported by Science and Technology Plan of Zhejiang Province(No. 001101027)

Zhou Qincun male, was born in 1977, PhD candidate. His research interests are in the design, simulation, and fabrication of integrated wave-length division multiplexers.

Received 15 March 2003, revised manuscript received 28 May 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics