

三维有限差分光束传输法在 AWG 中的应用

吴 薇¹, 刘 辛¹, 陈 婷²

(1. 武汉理工大学 理学院物理系, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉通信指挥学院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 文章以亥姆赫兹方程为基础, 推导了三维有限差分光束传输法(FD-BPM), 并在阵列波导光栅模拟计算中采用该方法对光场在阵列波导中的传输过程进行了计算和模拟。结果表明, 采用三维 FD-BPM 可提高计算精度。另外由于三维 FD-BPM 对纵向步长不敏感, 可通过加大步长来减少计算时间, 在提高精度的同时, 不影响计算时间。

关键词: 三维有限差分光束传输法; 亥姆赫兹方程; 阵列波导光栅

中图分类号: TN25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8788(2008)01-0057-02

Applications of 3-D finite-difference beam propagation method in AWG

Wu Wei¹, Liu Xin¹, Chen Ting²

(1. School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Wuhan Communication Command College, Wuhan 430010, China)

Abstract: On the basis of the Helmholtz equation, the 3-D Finite-Difference Beam Propagation Method (FD-BPM) is deducted, which is used in AWG simulations to compute and simulate the transmission process of the optical field in the array waveguide. The results show that the computation accuracy is improved by using 3-D BPM. Furthermore, as the 3-D BPM is insensitive to portrait step size, the calculation time can be shortened by increasing the step size, thus improving the accuracy with little effect on the calculation time.

Key words: 3-D FD-BPM; Helmholtz equation; AWG

随着光纤通信和光信号处理技术的发展, 人们越来越关注光集成技术。目前已有许多数值分析方法分析集成光波导, 包括线性法、模匹配法、耦合模理论、光束传输法(BPM)、时域有限差分法和有效折射率法等。由于 BPM^[1] 简单方便, 准确性高, 因此 BPM 是目前光波导器件研究与设计领域最流行的方法, 也是最适合于开发通用光波导器件 CAD 软件的方法。从模拟空间的角度, BPM 可分为二维 BPM 和三维 BPM。

对于一般的用 SiO₂ 制作的阵列波导光栅(AWG), 我们可以采用有效折射率方法将三维情况转化为二维情况, 再进行计算; 而对于 InP 制作的 AWG, 用有效折射率方法进行计算就很不准确, 此时最好用三维 BPM 来对光波导器件进行分析。

本文将介绍三维有限差分光束传输法(FD-BPM), 并采用三维 FD-BPM 对光场在阵列波导中的传输过程进行计算, 给出模拟结果。

1 三维 FD-BPM

三维 FD-BPM^[2~3] 是在亥姆赫兹方程的基础上进行推导。三维亥姆赫兹方程如式(1)所示:

$$2ik_0 n_c \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + k_0^2 (n^2 - n_c^2) E, \quad (1)$$

将式(1)写成差分形式, 得到式(2)和式(3), 式中, i 表示 x 方向; j 表示 y 方向, 此两式仍为三对角方程组。

$$4ik_0 n_c \frac{E_{ij}^{n+0.5} - E_{ij}^n}{\Delta z} = \frac{E_{i-1j}^{n+0.5} - 2E_{ij}^{n+0.5} + E_{i+1j}^{n+0.5}}{(\Delta x)^2} + \frac{E_{ij-1}^n - 2E_{ij}^n + E_{ij+1}^n}{(\Delta y)^2} + k_0^2 [(n_{ij}^n)^2 - n_c^2] E_{ij}^n, \quad (2)$$

$$4ik_0 n_c \frac{E_{ij}^{n+1} - E_{ij}^{n+0.5}}{\Delta z} = \frac{E_{i-1j}^{n+1} - 2E_{ij}^{n+1} + E_{i+1j}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{E_{ij-1}^{n+0.5} - 2E_{ij}^{n+0.5} + E_{ij+1}^{n+0.5}}{(\Delta y)^2} + k_0^2 [(n_{ij}^{n+1})^2 - n_c^2] E_{ij}^{n+1}, \quad (3)$$

合并相应项后, 最后求解方程为式(4)和式(5)。

$$eE_{i-1j}^{n+0.5} + aE_{ij}^{n+0.5} + eE_{i+1j}^{n+0.5} = fE_{ij-1}^n + bE_{ij}^n + fE_{ij+1}^n, \quad (4)$$

$$-fE_{i-1j}^{n+1} + cE_{ij}^{n+1} - fE_{i+1j}^{n+1} = -eE_{ij-1}^{n+0.5} + dE_{ij}^{n+0.5} - eE_{ij+1}^{n+0.5}, \quad (5)$$

式中,

$$a = c = 2(\Delta y)^2 + \frac{4jk_0 n_c (\Delta x)^2 (\Delta y)^2}{\Delta z} - \frac{(\Delta x)^2 (\Delta y)^2 k_0^2 (n_{ij}^2 - n_c^2)}{2};$$

$$b=d=\frac{4jk_0n_c(\Delta x)^2(\Delta y)^2}{\Delta z}-2(\Delta x)^2+\frac{(\Delta x)^2(\Delta y)^2k_0^2(n_{ij}^2-n_c^2)}{2};$$
$$e=-\Delta y^2;\qquad f=\Delta x^2.$$

由于是三维， x 、 y 方向都为未知数，要用方向交替隐含追赶法对其求解。这种方法的实质是把时间步长 Δt 分成两个半步，前半步在 x 方向用隐格式， y 方向用显格式；后半步在 y 方向用隐格式， x 方向上用显格式；如此循环，逐步求解。

2 三维 FD-BPM 在 AWG 模拟计算中的应用

2.1 AWG 器件的基本结构

AWG 器件主要是由输入/输出波导、AWG 及连接它们的两个对称平板波导组成，输入/输出波导连接平板波导的一端，均匀地排列在一个半径为 R 的罗兰圆上，每条阵列波导正对中心输入 / 输出波导出射端位置 O ，均匀地排列在以 O 为圆心、半径 $R_1=2R$ 的光栅圆周上，这种设计采用的即是罗兰圆结构设计。阵列波导是 AWG 器件的分光部分，相邻波导的光程差是中心载波波长的整数倍，阵列波导数为 $2M+1$ 。AWG 平面结构图如图 1 所示。

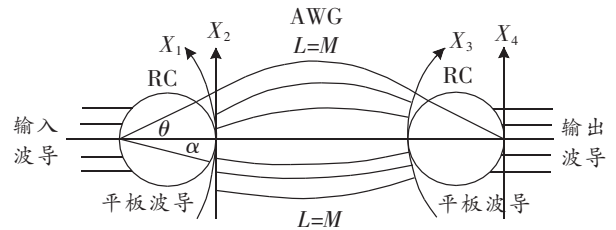


图 1 AWG 器件的平面结构图

2.2 三维 FD-BPM 在 AWG 模拟计算中的应用

一般 AWG 模拟计算^[4~5]，对光场经过阵列波导部分采用的处理方法是直接在输入平板的输出光场上加上位相差，这样就没有考虑相邻阵列间的光场串扰作用。为了更准确地计算传输光场，本文对阵列波导部分的模拟计算采用的处理方法是先使用三维 FD-BPM 计算输入平板的输出光场在经过一段直波导阵列后的光场分布，然后再加上位相差。设计一个 1×8 AWG，图 2 为用三维方法计算的 1×8 AWG 中输入平板波导的输出光场经过一段直波导阵列传输后的三维图形，可以看出光场被很好地限制在直阵列中传输，达到了稳定的传输状态。

图 3 是采用三维 FD-BPM 时 1×8 AWG 的光谱响应图。图 4 是没有计算光场在直阵列中传输时

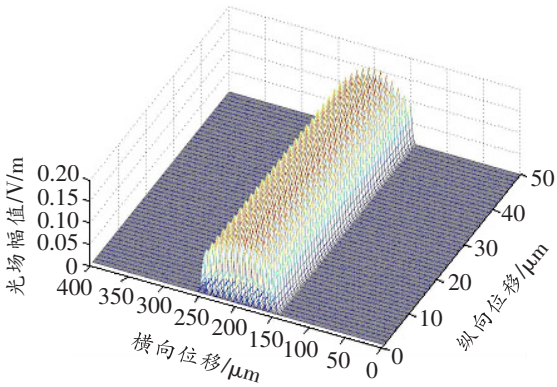


图 2 光场在直波导阵列中的传输

1×8 AWG 的光谱响应图。比较图 4 与图 3 可以发现，图 4 所示光谱变窄了，光功率变小了，而且相邻信道光谱的交点降低了，不同信道的光谱相差很大，这是因为没有考虑阵列波导间的串扰。由此可见，加入对直阵列波导的光场计算提高了计算的精度，使计算结果更接近于实际情况。

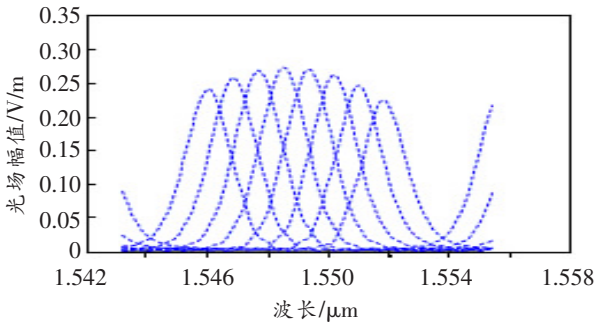


图 3 采用三维 FD-BPM 的 1×8 AWG 光谱响应

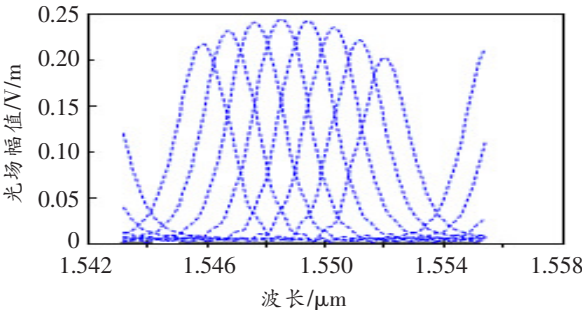


图 4 1×8 AWG 中未计算直波导阵列时的光谱响应

3 对三维 FD-BPM 步长的讨论

由于三维 FD-BPM 中把时间步长 Δt 分成两个半步，因此在计算同样的传播长度时，比二维 FD-BPM 要多花一倍的时间。但是通过多次改变步长计算发现，三维 FD-BPM 对纵向步长是不敏感的，纵向步长取 $1\ \mu\text{m}$ 和取 $5\ \mu\text{m}$ 时，阵列波导输出端各

(下转第 64 页)