

# 基于 FD-BPM 方法的阵列波导光栅模拟<sup>\*</sup>

周勤存 戴道锌 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:** 给出了一种采用 FD-BPM 方法对整个阵列波导光栅(AWG) 器件进行方便而精确地模拟的方法和一个 AWG 设计实例的模拟结果, 并对模拟结果进行了分析。由模拟得到的器件基本参数与实际设计值符合得很好。

**关键词:** 阵列波导光栅; 有限差分光束传输法; 波分复用; 模拟计算

**EEACC:** 4310; 4140

**中图分类号:** TN814

**文献标示码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2002)12-1313-07

## 1 引言

随着现代通信容量的急剧增加, 现有光纤网络的传输容量的利用率已经日趋饱和, 密集波分复用技术(DWDM)是解决这一问题的行之有效的方法。波分复用器件是实现波分复用技术的基础, 而阵列波导光栅(AWG)是波分复用器件中最有前途的成员之一。

为了使设计出的 AWG 性能指标能够满足 DWDM 系统的严格要求, 对 AWG 进行精确地模拟是非常必要的。在 AWG 器件的模拟中, 广泛采用的一种方法是高斯光束近似方法<sup>[1-3]</sup>, 但是该方法不能得到精确的模拟结果。有限差分光束传输法(FD-BPM)也是目前广泛用于研究光波在波导中传播问题的方法, 这种方法原理简单, 是一种非常成熟而有效的模拟方法, 尤其适合于大尺寸器件的数值模拟<sup>[8]</sup>。本文采用 FD-BPM 方法对整个 AWG 器件进行模拟, 在模拟中, 将整个 AWG 器件分割成三个部分。下面将分别介绍 AWG 的基本设计原理、FD-BPM 算法、采用 FD-BPM 的模拟设计方法、设计实例及模拟结果。

## 2 AWG 的基本设计原理

阵列波导光栅复用器<sup>[4-8]</sup>主要由波导阵列、两

个自由传输区(FPR)FPR1、FPR2, 以及输入/输出波导等几部分组成。输入/输出波导连接自由传输区的一端并均匀地排列在罗兰圆周上(如图 1 所示)。每条阵列波导均正对中心输入/输出波导, 均匀地排列在以中心输入/输出波导为圆心的圆周上。在波导

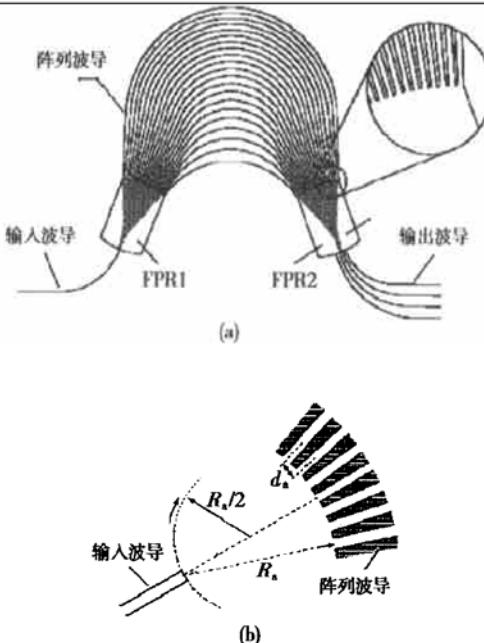


图 1 (a) AWG 波分复用器件原理图; (b) AWG 输入部分原理图

Fig. 1 (a) Configuration for AWG DEMUX; (b) Geometry for input part

\* 高等学校重点实验室访问学者基金和浙江省科技计划(项目号: 001101027)资助项目

周勤存 男, 1977 年出生, 博士研究生, 目前主要从事光纤通信中波分复用器件的研究。

2001-12-08 收到, 2002-08-02 定稿

©2002 中国电子学会

阵列中, 相邻的两条波导之间长度差为常数, 满足公式(1),

$$\Delta L = m\lambda_c/n_c = mc/n_c f_c \quad (1)$$

其中  $m$  为阵列波导的衍射级数;  $\lambda_c$  和  $f_c$  为真空中聚焦于中心输出波导的波长和频率;  $n_c$  为阵列波导的有效折射率.

对于聚焦于其它输出波导的波长, 阵列波导光栅满足如下光栅方程:

$$n_s d_a \sin \theta + n_c \Delta L = m\lambda \quad (2)$$

其中  $n_s$  为自由传输区的有效折射率;  $d_a$  是阵列相邻波导间的间距;  $\theta$  为输出波导的角位置;  $\theta = \Delta s/R_a$ ;  $R_a$  为自由传输区的长度;  $\Delta s$  为罗兰圈上离中心的偏移量.

线色散由公式(3)决定:

$$\frac{ds}{d\lambda} = R_a \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{n_s d_a} \times \frac{n_g R_a}{n_c} \quad (3)$$

其中  $n_g = n_c - \lambda \frac{dn_c}{d\lambda}$ , 称为群折射率.

自由光谱范围(FSR)可以近似地由公式  $f_{\text{FSR}} \approx f_c/m$  得到.

### 3 FD-BPM 算法

BPM<sup>[9]</sup> (beam propagation method) 方法是一种求解 Helmholtz 方程数值的方法, 近年来被广泛应用于光波导器件的模拟设计中.

应用有效折射率方法<sup>[10]</sup>, 可以将三维问题简化为二维问题. 二维标量波方程在单频波  $E(x, z, t) = \Phi(x, z) e^{-i\omega t}$  条件下, 可以写成  $\Phi$  的标量 Helmholtz 方程形式:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + [k(x, z)]^2 \Phi = 0 \quad (4)$$

其中  $k(x, z) = k_0 n(x, z)$ ,  $k_0$  是真空中的波矢,  $n(x, z)$  是折射率分布.

考虑到  $\Phi$  在传播方向  $z$  上主要为相位的变化, 把场的空间分布写为  $\Phi(x, z) = u(x, z) e^{ikz}$ , 其中  $\vec{k}$  是代表  $\Phi$  平均相位变化的参考波矢. 这样 Helmholtz 方程就改写为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2i\vec{k} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (k^2 - \vec{k}^2) u = 0 \quad (5)$$

在旁轴条件下, 可以认为  $\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \ll i\vec{k} \frac{\partial u}{\partial z}$ , 从而忽略

$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$  这一项, 这样得到旁轴条件下的公式:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{i}{2\vec{k}} (\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (k^2 - \vec{k}^2) u) \quad (6)$$

运用有限差分法, 就能给出上述方程(6)的数值解.

在广角 BPM 方法<sup>[11]</sup>中, 不忽略  $\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$  这一项, 把原方程(5)改写为:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = i\vec{k} (\sqrt{1+P} - 1) u \quad (7)$$

$$\text{其中算子 } P = \frac{1}{\vec{k}^2} (\frac{\partial^2}{\partial x^2} + (k^2 - \vec{k}^2)).$$

利用 Padé 近似,  $\sqrt{1+P} - 1 \approx \frac{N_m(P)}{D_n(P)}$ , 其中  $N_m$  和  $D_n$  分别为算子  $P$  的  $m, n$  阶多项式, 把公式(7)改写成:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = i\vec{k} \frac{N_m(P)}{D_n(P)} u \quad (8)$$

为了精确模拟 AWG 器件, 我们采用有限差分法对二阶 Padé 近似公式(8)进行数值求解. 公式(8)可以写成:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = i\vec{k} \frac{\frac{P}{2} + \frac{P^2}{4}}{1 + \frac{3P}{4} + \frac{P^2}{16}} u \quad (9)$$

由公式(9)对  $z$  轴进行离散化, 令  $u(z_n) = u^n$ , 取  $\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta z}$ ,  $u = \frac{u^{n+1} + u^n}{2}$  可得

$$u^{n+1} = \frac{1 + \xi_1 P + \xi_2 P^2}{1 + \eta_1 P + \eta_2 P^2} u^n \quad (10)$$

$$\xi_1 = \frac{3}{4} + \frac{i\vec{k}\Delta z}{4}, \quad \xi_2 = \frac{1}{16} + \frac{i\vec{k}\Delta z}{8},$$

其中

$$\eta_1 = \frac{3}{4} - \frac{i\vec{k}\Delta z}{4}, \quad \eta_2 = \frac{1}{16} - \frac{i\vec{k}\Delta z}{8}$$

(10) 式可以写成

$$u^{n+1} = \frac{(1 + a_1 P)(1 + a_2 P)}{(1 + b_1 P)(1 + b_2 P)} u^n \quad (11)$$

其中  $a_i, b_i (i=1, 2)$  可以通过多项式方程求解得到.

将(11)式分解为两步运算<sup>[12]</sup>, 每一步的形式为

$$u^{n+\frac{i}{2}} = \frac{1 + a_i P}{1 + b_i P} u^{n+\frac{i-1}{2}} \quad (12)$$

由公式(12)对  $x$  轴进行离散化, 令  $\left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right]_i = \left[ \frac{u_{j+1} - 2u_j + u_{j-1}}{\Delta x^2} \right]$ , 可得到方程(13)

$$A u_{j-1}^{n+\frac{i}{2}} + B u_j^{n+\frac{i}{2}} + C u_{j+1}^{n+\frac{i}{2}} = D \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= C = \left[ \frac{b_i}{\Delta x^2 \vec{k}^2} \right] \\ B &= 1 + \left[ \frac{b_i}{\vec{k}^2} \right] \left( k^2 - \vec{k}^2 \right) - \left[ \frac{2}{\Delta x^2} \right] \\ D &= \left[ \frac{a_i}{\Delta x^2 \vec{k}^2} \right] \left[ u_{j-1}^{n+\frac{i-1}{2}} + u_{j+1}^{n+\frac{i-1}{2}} \right] \\ &+ \left[ 1 + \frac{a_i}{\vec{k}^2} \right] \left( k^2 - \vec{k}^2 \right) - \left[ \frac{2}{\Delta x^2} \right] u_{j-1}^{n+\frac{i-1}{2}} \end{aligned} \quad (14)$$

这样就可以通过两次求解三对角矩阵来得到二阶 Padé 近似的广角 BPM 算法。对于边界处理, 我们采用透明边界条件(TBC)<sup>[13]</sup>。

#### 4 采用 FD-BPM 的模拟设计方法

应用广角 FD-BPM 方法对 AWG 器件进行模拟时, 我们把整个 AWG 器件分成三部分:

- (a) 第一个自由传输区(包括输入波导及部分阵列波导), 如图 2(a) 所示;
- (b) 阵列波导区;
- (c) 第二个自由传输区(包括输出波导及部分阵列波导), 如图 2(b) 所示。

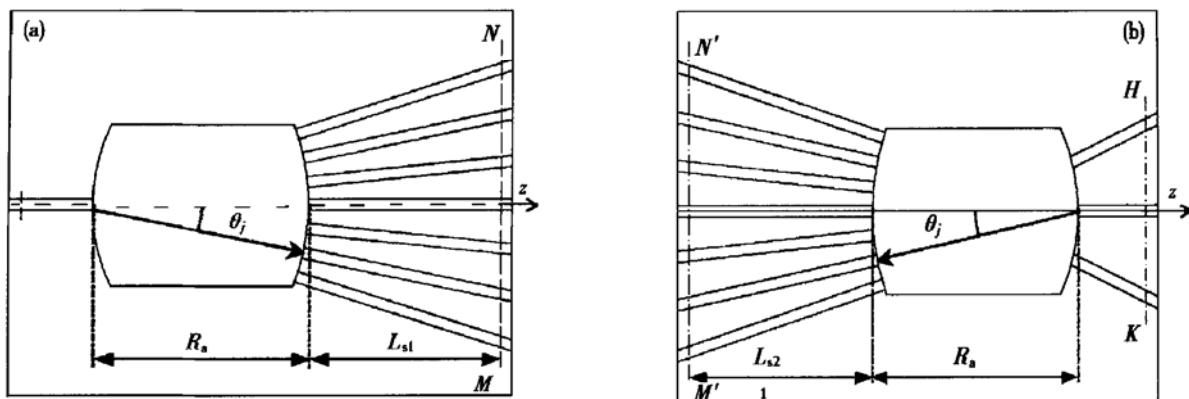


图 2 (a) 第一个自由传输区模拟结构图;(b) 第二个自由传输区模拟结构图

Fig. 2 (a) Configuration for the first FPR; (b) Configuration for the second FPR

#### 4.1 第一个自由传输区

在第一个自由传输区, 用上述的广角 FD-BPM 方法对其进行模拟计算, 从而得到耦合到各阵列波导中的能量及在输出面 MN 上各阵列波导中的相位分布。这里 MN 截面是距离 FPR1 输出端为  $L_{s1}$  的平面(见图 2(a))。取 MN 截面(而不是取弯曲的 FPR1 的输出面)是为了方便 BPM 的计算。

用输入波导的归一化基模  $E_m$  作为输入场, 即  $\left| \int E_m(x) E_m^*(x) dx \right| = 1$  (在本文中, 波导的基模均满足归一化条件), 输入场经过第一个自由传输区耦合到阵列波导中, 在阵列波导中经过足够远的传输, 使相互间的耦合可忽略, 此时在这个输出面 MN 上

计算得到各阵列波导对应的耦合系数和相位。

耦合系数定义<sup>[14]</sup>如下:

$$\eta_j = \frac{\left| \int \tilde{E}_{in}(x) E_m^*(x) dx^2 \right|}{\int \tilde{E}_{in}(x) E_m^*(x) dx \int E_m(x) E_m^*(x) dx} \quad (15)$$

由于波导模式是归一化的, 所以耦合到第  $j$  条阵列波导的能量  $\eta_j$  可由下列公式计算得到,

$$\eta_j = \left| \int \tilde{E}_{o1}(x) E_m^*(x - x_j) dx \right|^2 \quad (16)$$

其中  $E_{o1}(x)$  是截面 MN 上的场分布;  $x_j$  是第  $j$  条阵列波导的中心离中央波导的中心距。

第  $j$  条阵列波导对应的相位可由下列公式计算得到:

$$\varphi = \text{Phase} \left[ \int \tilde{E}_{o1}(x) e^{ik_0 z_0} E_m^*(x - x_j) dx \right] \quad (17)$$

其中 Phase 为求复数辐角的函数.

#### 4.2 阵列波导区

对于阵列波导区, 当相互间的耦合可忽略时, 我们只考虑它的相位作用. 对于长度为  $L$  的阵列波导, 其引入的相位为  $k_0 L n_c(\lambda)$ , 其中  $k_0$  为真空中的波数. 由于弯曲波导和直波导之间的有效折射率差别很小(当弯曲波导曲率半径很大时), 我们忽略两者的差异, 认为是相同的.

#### 4.3 第二个自由传输区

在第二个自由传输区, 同样用广角 FD-BPM 方法对其进行模拟计算, 得到各输出波导的能量输出.

首先需要重建 BPM 的输入场. 取  $M'N'$  截面上的场为 BPM 的起始输入场, 这里  $M'N'$  截面为距离 FPR<sub>2</sub> 的阵列波导端面为  $L_{s2}$  的一个平面(见图 2(b))其输入场为各阵列波导基模的叠加, 各基模的振幅和相位均受到调制. 根据前面的分析输入场可由下面的公式表示:

$$E_{in} = \sum_{j=1}^N \sqrt{\eta_j} E_m(x - x_j) \exp(i\varphi_j) \exp(ik_0 \bar{L}_j n_c(\lambda)) \quad (18)$$

其中  $\eta_j$  为公式(16)表示,  $\varphi_j$  为公式(17)表示.

$\bar{L}_j$  为第二部分中波导阵列中第  $j$  条波导的长度, 可表示为:

$$\bar{L}_j = L_j - \frac{L_{s1} + L_{s2}}{\cos(\theta_j)} = L_0 + (j - 1) \Delta L - \frac{L_{s1} + L_{s2}}{\cos(\theta_j)} \quad (19)$$

其中  $L_0$  为波导阵列中第一条波导的长度;  $L_{s1}$ 、 $L_{s2}$ 、 $\theta_j$  如图 2(a)、(b) 所示, 一般我们取  $L_{s1} = L_{s2} = L_s$ .

重建输入场后, 我们用 BPM 模拟场在第二个自由传输区的传输, 最后得到输出截面 HK 上的场分布  $E_{o2}(x)$ . 则各输出波导的能量输出可由下述公式计算得到:

$$P_i = \left| \int \tilde{E}_{o2}(x) E_m^*(x - x_i) dx \right|^2 \quad (20)$$

#### 4.4 频谱响应

最后, 通过扫描波长, 就可以得到 AWG 器件的频谱响应图, 从而得到一些重要的器件性能指标.

### 5 设计例子及模拟结果

本文所采用的波导结构为掩埋型方形波导, 如图 3 所示, 包层折射率  $n_{el}$  为 1.46, 芯层为  $W \times W$  的正方形( $W = 5\mu m$ ), 芯层折射率  $n_{co}$  为 1.47. 通过有效折射率方法, 把三维结构等效为二维结构, 等效折射率如表 1 所示. 我们应用以上的模拟方法对设计参数如表 1 所示的 AWG 器件进行模拟.

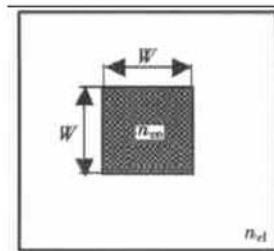


图 3 掩埋方形波导结构

Fig. 3 Cross section for a buried waveguide

表 1 AWG 设计参数

Table 1 Parameters for the designed AWG

参数名称	符号	取值
AWG 通道数	$N_{ch}$	8
通道间隔	$\Delta f$	200GHz
中心通道波长	$\lambda_0$	1.55575μm
波导宽度	$W$	5μm
包层折射率(一次等效)	$n_{el\_eff}$	1.46
芯层折射率(一次等效)	$n_{co\_eff}$	1.46685
FPR 折射率(一次等效)	$n_{FPR\_eff}$	1.46685
波导阵列中心间隔	$d_a$	10μm
波导阵列级数	$m$	45
FPR 长度	$R_a$	5000μm
输出波导中心距	$d_r$	24.585μm
阵列波导数	$N_{awg}$	121

#### 5.1 第一个自由传输区

图 4 为光波在第一个自由传输区传播图, 光波从输入波导输入, 经过自由传输区耦合到波导阵列中. 耦合到各阵列波导中能量如图 5 所示. 其总能量约为 0.915, 即此处耦合损耗为 8.5%.

#### 5.2 第二个自由传输区

图 6 为第二个自由传输区的输入场分布. 图 7

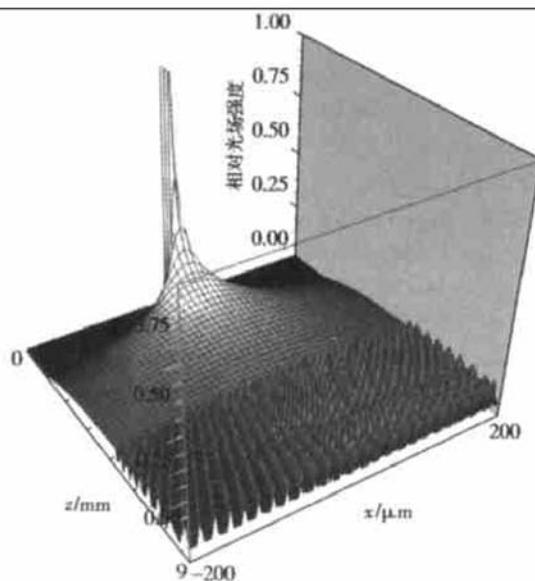


图 4 光波在第一个自由传输区传播  
Fig. 4 Beam propagation in the first FPR

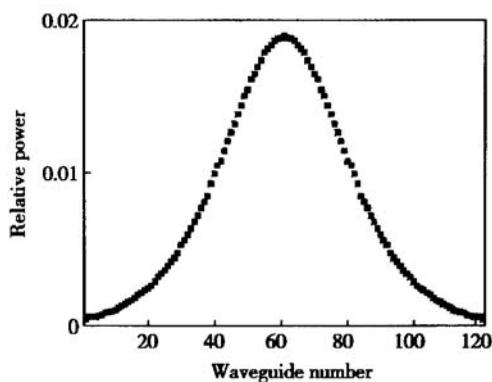


图 5 从自由传输区耦合到波导阵列的能量  
Fig. 5 Power coupled into the array waveguide from the first FPR

(a) 是光波在第二个自由传输区的传播衍射图, 图 7 (b) 是在成像面得到的场强分布。从图 7(a)、7(b) 中我们可以看出, 除了  $m$  级主峰外, 还有  $m \pm 1$  级次级峰, 其峰值约为主峰的三分之一, 也就是说  $m \pm 1$  次级峰会引入损耗约 22.2%, 是造成器件插入损耗的一个主要原因。 $m \pm 1$  次级峰出现的位置为  $x = \pm 529\mu\text{m}$  处, 而理论上计算值为  $x = \pm 527\mu\text{m}$ , 两者基本一致。

### 5.3 频谱响应图

如图 7 所示, 模拟得到的通道间隔为 200GHz, 与设计值吻合, 器件的通道间串扰优于 40dB, 最小

插入损耗约为 1.6dB, 插入损耗均匀性约为 1dB.

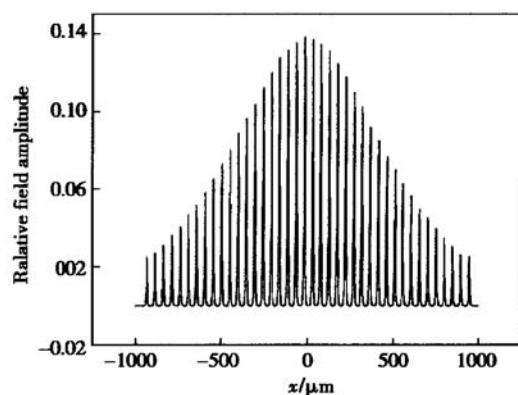


图 6 第二个自由传输区 BPM 的输入场分布  
Fig. 6 Start field distribution for the BPM simulation of second FPR

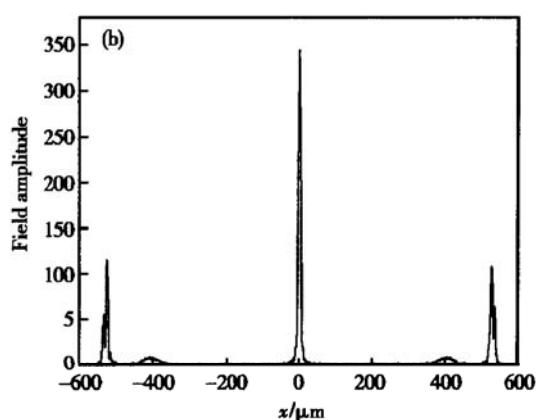
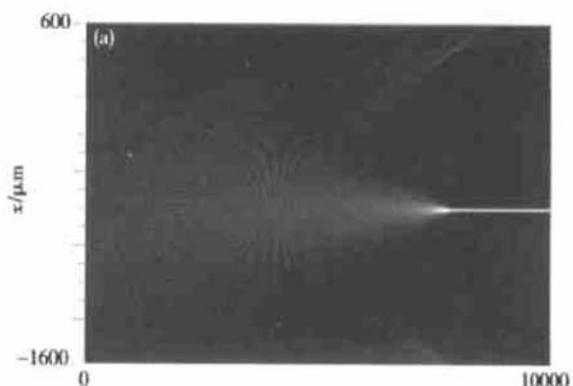


图 7 (a) 光波在第二个自由传输区的传输衍射图; (b) 成像面的场强分布  
Fig. 7 (a) Beam propagation in the second FPR;  
(b) Field distribution at the image plane

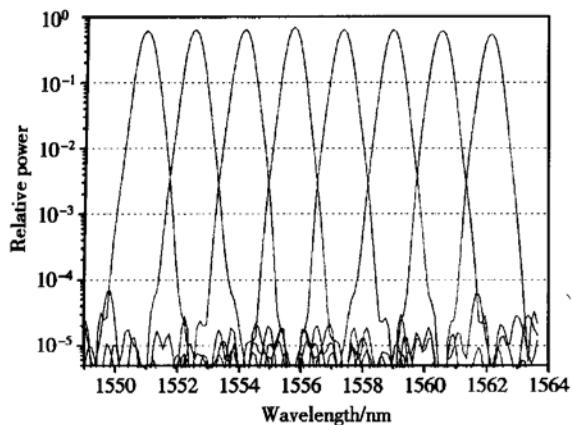


图 8 AWG 器件的频谱响应图

Fig. 8 Spectra response for the designed AWG

## 6 总结

本文给出了应用广角 FD-BPM 模拟 AWG 器件的具体方法, 并且对一个设计实例给出了相应的模拟结果, 模拟结果的一些重要参数与设计值相吻合。应用该模拟方法不仅可以评估 AWG 器件的性能指标, 而且对优化设计 AWG 器件也起到重要作用。相对于高斯近似的模拟方法, 本文的 BPM 模拟方法应用范围更广泛, 它适用于频谱平坦化的 AWG 器件的模拟设计(如对采用 MMI 方法平坦化频谱), 而这对高斯近似的模拟方法是很困难的。

## 参考文献

- [ 1 ] Weber J P. Device design using Gaussian beams and ray matrices in planar optics. *IEEE J Quantum Electron*, 1992, 30 (10): 2407
- [ 2 ] He J J, Lamontagne B, Delage A, et al. Sources of crosstalk in grating based monolithic integrated wavelength demultiplexers. International Conference on Application of Photonic Technology, Ottawa, Canada, 1998: 27
- [ 3 ] Dai Daoxin, Zhou Qincun, He Sailing, et al. A simple simulation method for AWG and analysis for fabrication tolerances. *Acta Photonica Sinica*, to be published[ 戴道锌, 周勤存, 何赛灵, 等. 阵列波导光栅(AWG)的简便模拟方法及其在工艺误差分析上的应用. 光子学报, 待发表]
- [ 4 ] Ou Haiyan, Lei Hongbing, Yang Qinling, et al. Simple method for designing  $1 \times 8$  arrayed-waveguide grating multi/demultiplexers. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2000, 21(8): 798 (in chinese)[ 欧海燕, 雷红兵, 杨沁清, 等.  $1 \times 8$  阵列波导光栅型波分复用/解复用器设计的一种简单方法. 半导体学报, 2000, 21(8): 798]
- [ 5 ] Smit M K, Van Dam C. Phasar based WDM devices: principles, design and applications. *IEEE Quantum Electron*, 1996, 2(2): 236
- [ 6 ] Takahashi H, Oda K, Toba H, et al. Transmission characteristics of arrayed waveguide  $N \times N$  wavelength multiplexer. *J Lightwave Technol*, 1995, 13(3): 447
- [ 7 ] Kaneko A, Goh T, Yamada H, et al. Design and applications of silica-based planar lightwave circuits. *IEEE Quantum Electron*, 1999, 5(5): 1227
- [ 8 ] Scarmozzino R, Osgood R M Jr. Simulation and computer aided design of large-scale photonic integrated circuits using the beam propagation method (BPM). *LEOS '97 10th Annual Meeting. Conference Proceedings*, 1996, 1: 403
- [ 9 ] Scarmozzino R, Osgood R M Jr. Comparison of finite-difference and Fourier-transform solutions of the parabolic wave equation with emphasis on integrated-optics applications. *J Opt Soc Am A*, 1991, 8(5): 724
- [ 10 ] Hocker G B, Burns W K. Mode dispersion in diffused channel waveguide by the effective index method. *Appl Opt*, 1977, 16 (1): 113
- [ 11 ] Ronald Hadley G. Wide-angle beam propagation using Padé approximant operators. *Opt Lett*, 1992, 17(20): 1426
- [ 12 ] Ronald Hadley G. Multistep method for wide-angle beam propagation. *Opt Lett*, 1992, 17(24): 1743
- [ 13 ] Ronald Hadley G. Transparent boundary condition for the beam propagation method. *IEEE J Quantum Electron*, 1992, 28(1): 363
- [ 14 ] Hunsperger R G. Integrated optics: theory and technology. Third edition. New York: Springer-Verlag, 1991: 91

## Simulation of Arrayed Waveguide Gratings Using a Finite Difference Beam Propagation Method<sup>\*</sup>

Zhou Qincun, Dai Daoxin and He Sailing

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

**Abstract:** A method based on wide-angle FD-BPM is presented to simulate the AWG performance. To show the effectiveness of the method, numerical results for a designed AWG are given, which well agree with the designed values.

**Key words:** arrayed waveguide gratings; finite difference beam propagation method; WDM; simulation

**EEACC:** 4310; 4140

**Article ID:** 0253-4177(2002)12-1313-07

\* Project supported by Visiting Scholar Funds of Key Laboratory of University and Science and Technology Plan of Zhejiang Province(No. 001101027)

Zhou Qincun male, was born in 1977, PhD candidate. His research activities are in design, simulation and fabrication of integrated wavelength division multiplexers.