

文章编号: 0258-7025(2002)07-0639-04

# 相位误差对阵列波导光栅传输特性的影响

朱大庆, 陆冬生, 许振鄂

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

**摘要** 研究了阵列波导光栅(AWG)制作过程中产生的误差所引起的相位误差对 AWG 传输特性的影响。非随机误差引起的相位误差使信道的中心波长产生漂移, 研究表明波导宽度  $0.02 \mu\text{m}$  的变化将引起中心波长漂移  $0.1 \text{ nm}$ 。随机误差所产生的随机相位误差将恶化 AWG 的串扰特性, 计算表明, 最大随机误差为  $0.00004 \text{ rad}/\mu\text{m}$  时, 串扰将增加  $42 \text{ dB}$ 。

**关键词** 阵列波导光栅, 制作误差, 相位误差, 集成光学

中图分类号 O 12 文献标识码 A

## Impact of Phase Error on Crosstalk of AWGs

ZHU Da-qing, LU Dong-sheng, XU Zhen-e

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** The impacts of phase errors induced by the fabrication errors on the transmission characteristics of an AWG are studied in this paper. The non-random phase error makes the central wavelength of the channels shift, the studies show that when the  $0.02 \mu\text{m}$  change of the width of the waveguide will cause  $0.1 \text{ nm}$  shift of the central wavelength. The random phase error deteriorates the crosstalk of an AWG, the studies show that the maximum random error of  $0.00004 \text{ rad}/\mu\text{m}$  will make the crosstalk increase  $42 \text{ dB}$ .

**Key words** AWG, fabrication error, phase error, integrating optics

## 1 引 言

在密集波分复用(DWDM)中, 波长滤波器是最重要的无源器件。阵列波导光栅(AWG)作为波长滤波器, 以其低插入损耗、高稳定性、易于大规模制作、潜在的低制造成本和易于与有源器件集成等优点成为最有竞争力的器件<sup>[1, 2]</sup>。

实际应用中, 对 AWG 器件的传输特性, 如信道中心波长的稳定性和串扰特性有一定的要求<sup>[3]</sup>。在实际的 AWG 器件中, 中心波长漂移和串扰主要是由制作误差引起的<sup>[4]</sup>。制作误差包括波导宽度误差和折射率的不均匀性<sup>[5]</sup>。这些制作误差引起传输模场的相位误差和倾斜<sup>[6]</sup>, 从而引起器件中心波长的漂移, 增加了信道间的串扰。文献[5, 6]研究了如何

测量和区分这些误差。

本文通过光束传播法(BPM)研究了相位误差的大小对 AWG 器件中心波长的漂移和串扰特性的影响。

## 2 相位误差

AWG 的结构示意图如图 1 所示。在理想的 AWG 器件中, 光波从输入波导通过平板波导(罗兰圆)传输到波导阵列的输入口进入波导阵列, 如果在输入口处从各波导输入的光波是等相位的, 波导从波导阵列的输出口输出时, 对中心波长  $\lambda_c$  来说, 任何两相邻的波导之间的相位差应该为

$$\Delta\phi_0 = \phi_{i0} - \phi_{i-1,0} = \beta_0\Delta L \quad (1)$$

收稿日期 2001-10-29; 收到修改稿日期 2002-01-18

基金项目 教育部留学回国人员科研启动基金(教外司函[1999]621号)和华中科技大学 2001 年校基金资助项目。

作者简介 朱大庆(1966—)男, 华中科技大学激光研究院博士后, 博士, 现主要从事集成光子器件的研究。E-mail: zhenex

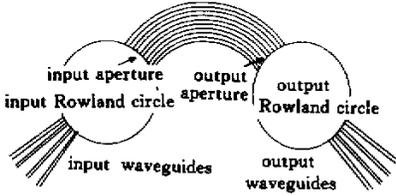


图1 AWG结构示意图

Fig.1 Structure of an AWG

其中  $\phi_{i0} = \beta_0 L_i$  为光波通过第  $i$  根波导后的相位变化,  $\Delta L$  为相邻波导的长度差,  $\beta_0$  为光波在波导中的传播常数,  $L_i$  为第  $i$  根波导的长度。在实际制作中, 波导长度和宽度以及折射率的分布都有误差。波导宽度和折射率误差造成传播常数  $\beta$  的变化, 加上波导长度的误差, 光波通过每根波导后的相位变化与理论设计的值有一定的差别, 使得两相邻的波导之间的相位差不能满足(1)式, 从而产生了中心波长的漂移和增加了信道间的串扰。

可以将所有的相位误差等效为由传播常数  $\beta$  的变化  $\delta\beta$  引起的, 则通过第  $i$  根波导后光波的相位变化  $\phi_i = L_i$  可以写为

$$\phi_i = \phi_{i0} + \delta\phi_i = (\beta_0 + \delta\beta_i)L_i \quad (2)$$

一般来说,  $\delta\beta$  是由波导宽度误差和折射率分布误差引起的。相邻波导的相位差为

$$\Delta\phi = \phi_i - \phi_{i-1} = \Delta\phi_0 + (\delta\beta_i - \delta\beta_{i-1})L_i + \delta\beta_{i-1}\Delta L \quad (3)$$

相位误差则为

$$\alpha(\Delta\phi)_i = (\delta\beta_i - \delta\beta_{i-1})L_i + \delta\beta_{i-1}\Delta L \quad (4)$$

从式(4)可知, 相位误差可以分为两部分: 一部分与相邻波导间传播常数的差别和波导长度有关, 减少波导长度可以降低这一部分的相位误差; 另一部分只与传播常数的误差有关, 是由波导的宽度、折射率分布情况决定的。AWG器件中, 波导通常是对称波导, 则其基模的传播常数  $\beta$  可以由下式求出<sup>[7]</sup>

$$\tan\left(\frac{\kappa w}{2}\right) = \frac{\gamma}{\kappa} \quad (5)$$

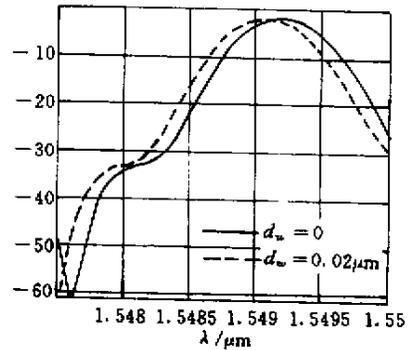
其中  $w$  为波导宽度,  $\kappa = \sqrt{n_1^2 k^2 - \beta^2}$ ,  $\gamma = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k^2}$ ,  $n_1, n_2$  分别为波导芯层和包层的折射率,  $k$  为光波在真空中的传播常数。由(5)可知, 波导宽度和折射率分布的误差引起传播常数的改变(2)式中的  $\delta\beta_i$  可以看作整根波导的总体传播常数的变化。

### 3 非随机误差和随机误差

在制作 AWG 器件过程中, 掩模制作工艺保证了掩模制作的精度, 即掩模宽度是一致的。在将掩模图案复制到芯片上时, 由掩模引起的波导宽度误差是一致的, 所有的波导都宽了或窄了。这种误差是一种非随机误差。另外, 由于边缘效应和刻蚀产生的误差, 以及折射率分布的误差是一种随机误差。这两种误差对 AWG 传输特性的影响是不同的。

#### 3.1 非随机误差

对每根波导来说, 非随机误差引起的传播常数变化是相同的, 其引起的相位误差可以由(4)式右边的第二项计算, 在计算时传播常数采用同一值。对称波导基模的传播常数随波导平均宽度的变化可由(5)式得到。在波导折射率为 1.50686, 包层折射率为 1.5, 波长为  $1.55 \mu\text{m}$ , 信道间隔为  $1.6 \text{ nm}$  时, 对  $5 \mu\text{m}$  宽的波导, 当宽度变化为  $-0.02 \mu\text{m}$  时, 通过 BPM 方法计算的输出频谱的变化见图 2。可以看出, 信道的中心波长漂移达到  $0.1 \text{ nm}$ 。而在制作过程中  $0.02 \mu\text{m}$  是个非常高的标准, 因此, 必须采取某些方法补偿由于波导宽度的平均变化而引起的中心波长漂移。例如温度补偿, 通过调节温度使得材料折射率发生变化, 来补偿因波导实际宽度与设计值的不同而产生的中心波长的漂移, 使得器件信道的中心波长与设计值相同。其他的补偿方法如改进设计等可参考文献[8]。

图2 波导宽度变化  $0.02 \mu\text{m}$  时 AWG 输出频谱的变化Fig.2 Change of output spectrum of an AWG when the width of the waveguide changes  $0.02 \mu\text{m}$ 

#### 3.2 随机误差

由边缘效应、刻蚀和折射率分布不均匀产生的误差属于随机误差, 对每一根波导来说, 都是不一样的。由随机误差产生的波导中传播常数的改变可以

写为

$$\delta\beta_i = r_i A \quad (6)$$

其中  $A$  为某一常数,  $r_i$  为一处于  $-1$  与  $1$  之间的随机数。参照文献 [5] 所测量的数据, 实际的随机误差的方差可以为  $\sigma(\delta\phi) = 0.2$  rad。则在本文的例子中, 波导阵列长度为  $40$  mm 左右, 而 (6) 式为白噪声形式, 对应  $\sigma(\delta\phi) = 0.2$  rad 的  $A$  值约为  $0.000006$  rad/ $\mu\text{m}$ , 即相位误差的值落在  $-0.2$  rad 与  $0.2$  rad 内的几率为  $83.3\%$ 。文献 [5] 通过纯理论公式计算了  $A = 0.00001$  rad/ $\mu\text{m}$  时, 随机误差对输出频谱的影响是串扰(噪声平台)由理论上的  $-60$  dB 增加到  $-25$  dB。为了研究更大的随机误差的影响, 选择大于  $0.00001$  rad/ $\mu\text{m}$  的不同的  $A$  值, 相位误差可以通过 (4) 式右边的第一项得到。选择 3.1 节中的波导参数, 各种  $A$  值下通过 BPM 方法模拟的 AWG 的输出频谱如图 3 所示。

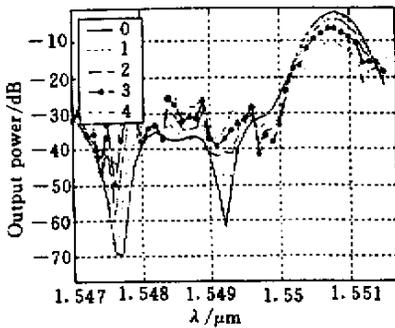


图 3 随机误差对 AWG 输出频谱的影响

Fig.3 Impact of random errors on the output spectrum of an AWG

0 :  $A = 0$ , 1 :  $A = 0.00001$  rad/ $\mu\text{m}$ , 2 :  $A = 0.00002$  rad/ $\mu\text{m}$ ,  
3 :  $A = 0.00003$  rad/ $\mu\text{m}$ , 4 :  $A = 0.00004$  rad/ $\mu\text{m}$

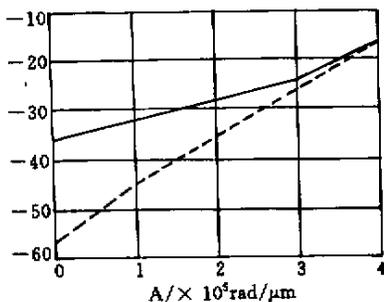


图 4 随机误差对 AWG 相邻信道串扰的影响

Fig.4 Impact of random errors on the adjacent crosstalk of an AWG

由图 3 可以看出, 在模拟所用的波长范围内 ( $1546.8 \sim 1551.5$  nm), 当  $A = 0$  时, BPM 模拟的噪声平台约  $-35$  dB; 当  $A > 0.00002$  rad/ $\mu\text{m}$ , 即  $\sigma(\delta\phi) > 0.4$  rad 时, 输出频谱恶化。特别是在  $A = 0.00004$  rad/ $\mu\text{m}$  时, 不但噪声平台增加为  $-10$  dB, 而且中心波长漂移了  $0.1$  nm, 其输出频谱严重恶化, 相邻信道间串扰大大增加。选择中心波长为  $1.5508$   $\mu\text{m}$  和  $1.5492$   $\mu\text{m}$  的相邻两信道和不同的波导宽度, 计算不同的  $A$  值下在中心波长的“clear window”内串扰的最坏值作为该相邻两信道之间的串扰, 结果如图 4。“clear window”的宽度一般规定为信道间隔的  $1/4$ , 例如对本文中的  $1.6$  nm 信道间隔, 一般规定为中心波长  $\pm 0.2$  nm。从图中可看出, 波导宽度为  $5$   $\mu\text{m}$ , 无随机误差时信道间的串扰为  $-36$  dB;  $A = 0.00001$  rad/ $\mu\text{m}$ , 即  $\sigma(\delta\phi) = 0.2$  rad 时, 串扰为  $-32.5$  dB。

在制作工程中, 随机误差是不可避免的, 同时随机误差也很难补偿, 只有通过改善加工工艺来提高制作精度, 减小随机误差, 或通过优化设计, 减小 AWG 的输出特性对随机误差的敏感程度。如由 (4) 式可知, 减小阵列波导的长度, 可以减少随机相位误差。又如, 从图 4 可以看出, 波导宽度不同, 随机误差对相邻信道之间串扰的影响不同。在  $A$  值从 0 变化到  $0.00004$  rad/ $\mu\text{m}$  的情况下, 波导宽度为  $5$   $\mu\text{m}$  时, 串扰从  $-36$  dB 上升到  $-16$  dB, 波导宽度为  $4$   $\mu\text{m}$  时, 串扰从  $-58$  dB 上升到  $-16$  dB。由图 4 还可以看出, 由于不同的波导宽度对串扰的影响是不同的, 波导宽度等于  $4$   $\mu\text{m}$  时相邻信道串扰比等于  $5$   $\mu\text{m}$  时低, 表明对本文的例子来说  $4$   $\mu\text{m}$  是更“好”的波导宽度, 关于波导宽度对相邻信道之间串扰的影响的具体讨论见文献 [9]。虽然波导宽度等于  $4$   $\mu\text{m}$  时的串扰小于等于  $5$   $\mu\text{m}$  时的串扰, 但前者对随机误差的敏感程度要大得多, 特别是在小随机误差时, 情况更为严重。由此可见, 通过优化设计, 如适当增加波导宽度, 可以在设计串扰特性改变不大的情况下, 减小 AWG 器件对随机制作误差的敏感程度, 从而提高器件制作的一致性。

随机误差很难补偿, 只能通过改善加工工艺来提高制作精度, 或通过优化设计, 减小 AWG 输出特性对随机误差的敏感程度。

## 参 考 文 献

- 1 A. A. M. Staring, M. K. Smit. Phased-array-based photonic integrated circuits for wavelength division multiplexing applications [J]. *IEICE Trans. Electron.*, 1997, **E80-C**(5): 646 ~ 653

- 2 Emil S. Koteles. Integrated planar waveguide demultiplexers for high-density WDM applications [ J ]. *Fiber and Integrated Optics* ,1999 ,**18**( 4 ) 211 ~ 244
- 3 H. Takahashi , K. Oda , H. Toba. Impact of crosstalk in an arrayed-waveguide multiplexer on  $N \times N$  optical interconnection [ J ]. *J. Lightwave Technol.* ,1996 ,**14**( 6 ) :1097 ~ 1105
- 4 Meint K. Smit , Cor van Dam. Phasar-based WDM-devices : Principles , design and applications [ J ]. *IEEE J of Sel. Top. in Quantum Electronics* ,1996 ,**2**( 2 ) 236 ~ 250
- 5 T. Goh , S. Suzuki , A. Sugita. Estimation of waveguide phase error in silica-based waveguides [ J ]. *J. Lightwave Technol.* , 1997 ,**15**( 11 ) 2107 ~ 2113
- 6 K. Takada , H. Yamada , Y. Inoue. Origin of channel crosstalk in 100 GHz-spaced silica-based arrayed-waveguide grating multiplexer [ J ]. *Electron. Lett.* ,1995 ,**31**( 14 ) :1176 ~ 1177
- 7 Dietrich Marcuse. Theory of Dielectric Optical Waveguides [ M ]. San Diego : Academic Press , 1974
- 8 H. Uetsuka , K. Akiba , K. Morosawa *et al.*. Wavelength division multi/demultiplexer with arrayed waveguide grating [ J ]. *IEICE Trans. Electron.* ,1997 ,**E80-C**( 5 ) 619 ~ 624
- 9 Zhu Daqing , Lu Dongsheng , Xu Zhene *et al.*. Impact of the design parameters of AWG on crosstalk [ J ]. *Chinese J. Lasers* ( 中国激光 ) , 2002 , **A29**( Supplement ) :409 ~ 411 ( in Chinese )

## 半导体 DFB 激光多波长锁定器

密集波分复用( DWDM )技术是扩大光纤通信传输容量的有效途径 ,国际通信联盟( ITU )规定了光纤中光载波信道间距为 100 GHz 或 50 GHz ,相应的波长间距分别为 0.8 nm 和 0.4 nm ,这便要求各信道上的 DFB 激光器的波长有较高的稳定度 ,例如波长漂移  $< 2$  GHz。中国科技大学物理系采用高度热稳定材料制成的 F-P 标准具作波长传感 ,DFB 激光器作副载波小幅度调制 ,由波长漂移的差分信号对 DFB 激光器进行温度控制和波长锁定的方案 ,经过一年

的研制实现了 8 个波长的锁定。经测试 ,所研制的半导体 DFB 激光多波长锁定器样机的性能指标为 :在  $-5^{\circ}\text{C}$  到  $45.0^{\circ}\text{C}$  温度变化范围内 ,激光波长漂移为 1.9 GHz ,F-P 标准具在  $14^{\circ}\text{C}$  到  $49.0^{\circ}\text{C}$  范围内透射峰值波长漂移量  $< 0.01$  nm。

( 中国科学技术大学 ,安徽合肥 230026  
 谢建平 ,赵天鹏 ,明 海 ,许立新 ,吴云霞 ,  
 王 沛 ,王克彦 ,黄文财 ,陈曦曜 ,王安廷 ,  
 吕 亮 ,沈 锋 ,蔡 浒 )