

相位误差对 AWG 波分复用器非相邻通道串扰影响的分析

李 蔚 刘德明 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

摘要: 分析了工艺制作过程中引入的阵列波导相位误差以及由其所引起的非相邻通道间串扰性能的劣化, 给出了相应的分析公式. 利用该公式, 可以简捷地分析所设计的 AWG 型器件的非相邻通道串扰水平, 为优化 AWG 型器件的设计提供依据.

关键词: 阵列波导光栅; 波分复用解复用器; 串扰

EEACC: 1320

中图分类号: TN 252

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)12-1293-04

1 引言

已经证明密集波分复用技术是大容量、长程光传送网的最佳选择. 电信运营商更趋向于采用密集波分复用技术来快速提高已经敷设的光纤传送网络系统的容量. 密集波分复用解复用器件(DWDM de-multiplexer)是 DWDM 系统的关键器件. 器件的优劣直接影响到整个系统的容量和性能. 波导阵列光栅(arrayed waveguide grating, 简称 AWG)型密集波分复用器件(DWDM)具有体积小、性能稳定, 易于同其它器件集成, 易于批量生产, 以及有希望进一步降低成本的特点, 因而得到了快速的发展^[1].

与介质膜窄带滤光器技术制作的 DWDM 器件相比, 通过优化设计和工艺改进, AWG 型 DWDM 器件在附加损耗、通带宽度、信道间隔、通道数目等方面已经具有了明显的优势. 惟一没有优势的方面是 AWG 型 DWDM 器件的串扰水平. 对 AWG 型 DWDM 器件来说, 降低串扰既是关键也是难点, 尤其对制作工艺的要求十分苛刻, 因此需要在器件的设计和实际制作工艺过程中重点考虑. AWG 型

DWDM 器件的串扰分为相邻通道间的串扰和非相邻通道间的串扰. 目前商用化 40 通道 AWG 的相邻通道间串扰约为 -25dB, 非相邻通道间的串扰约为 -30dB. 相邻信道间的串扰主要来源于相邻波导间的模式耦合, 可以通过波导结构的优化设计和制作工艺改进来折中考虑. 在各种影响 AWG 型 DWDM 串扰的因素中, 工艺制作引入的阵列波导相位误差是引入串扰的主要原因^[2].

已经有比较多的文献介绍 AWG 器件结构的设计^[2~5], 以及对串扰问题的实验研究^[6,7], 但是对工艺引入串扰的理论分析不多. 本文分析了工艺制作过程中引入的阵列波导相位误差以及由其所引起的非相邻通道间串扰性能的劣化, 给出了相应的串扰分析公式. 利用该公式, 可以简捷地分析所设计 AWG 型器件的非相邻通道间串扰水平. 通过一个设计实例, 进一步验证了该公式的有效性.

2 理论分析

首先分析工艺制作过程中的阵列波导随机相位误差对 AWG 型 DWDM 器件非相邻信道串扰水平

李 蔚 女, 1968 年出生, 博士研究生, 主要从事光通信网络、系统以及通信光电子器件集成技术的研究.

刘德明 男, 1957 年出生, 教授, 博士生导师, 主要研究光纤通信系统、子系统和器件.

黄德修 男, 1937 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信系统、子系统和器件的研究.

2003-06-12 收到, 2003-10-21 定稿

©2003 中国电子学会

的影响. 图 1 给出了 AWG 型 DWDM 器件的平板波导部分的示意图, 其中 d 表示阵列波导在平板波

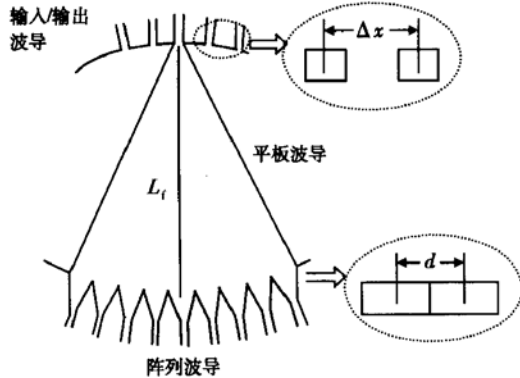


图 1 AWG 型 DWDM 器件的平板波导部分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of slab waveguide in AWG based DWDM demultiplexer

导的间距, L_f 为平板波导的焦距, Δx 分别为输入波导或输出波导在平板波导之间的间距. 假定阵列波导的长度差为 ΔL , 由 AWG 的光栅方程求出 AWG 的输出波导中的频谱响应为^[8]:

$$E = \sum_{j=0}^{n-1} \eta_j^2 \exp(j\alpha\Delta L) \times \exp[i\Phi_j + i2\pi j(n_g\Delta L + n_s d\theta)/\lambda] \quad (1)$$

其中 η_j 为第 j 个阵列波导中基本模场与输入波导的耦合系数; ΔL 为相邻阵列波导的长度差; θ 为输出平板波导焦平面上的点与中心阵列波导间的夹角; α 为材料损耗系数; λ 为波长; Φ_j 为第 j 个阵列波导中相位误差, 为小量. 将 (1) 式 Taylor 展开:

$$E = \sum_{j=0}^{n-1} \eta_j^2 \exp(j\alpha\Delta L) \exp[i2\pi j(n_g\Delta L + n_s d\theta)/\lambda] + i \sum_{j=0}^{n-1} \eta_j^2 \exp(j\alpha\Delta L) \exp[i2\pi j(n_g\Delta L + n_s d\theta)/\lambda] \Phi_j \quad (2)$$

假设波长 λ 的输出波导位置在 θ 处, 那么波长 λ 在其他非相邻信道内的串扰可以简单表示为:

$$|E_{\text{xtalk}}|^2 < \left| \sum_{j=0}^{n-1} \xi_j \right|^2 + \left| \sum_{j=0}^{n-1} \xi_j \Phi_j \right|^2 + 2 \left| \sum_{j=0}^{n-1} \xi_j \right| \times \left| \sum_{j=0}^{n-1} \xi_j \Phi_j \right| \quad (3)$$

上式中考虑到信道中心波长损耗比较小, 作为近似, 令信道中心波长功率为 1, 而且本文仅分析位相误差对 AWG 器件的串扰的影响, 所以令 $\alpha = 0$, 其中

$$\xi_j = \eta_j^2 \exp(j\alpha\Delta L) \exp[i2\pi j(n_g\Delta L + n_s d\theta)/\lambda] \quad (4)$$

其中 $\left| \sum_{j=0}^{n-1} \xi_j \right|^2$ 是由于非相邻波导间的耦合所引起的串扰水平的劣化, 一般很小, 可以忽略不计; $\left| \sum_{j=0}^{n-1} \xi_j \Phi_j \right|^2$ 是阵列波导随机相位误差所引起的串扰水平的劣化, 对非相邻信道串扰有主要贡献. 所以 (3) 式可以近似表示为

$$|E_{\text{xtalk}}|^2 \approx \left| \sum_{j=0}^{n-1} \xi_j \Phi_j \right|^2 \quad (5)$$

假设第 j 个阵列波导的随机相位误差的均方根为 $\sigma(\Phi_j)$, 则:

$$|E_{\text{xtalk}}|^2 \approx \left| \sqrt{\sum_{j=0}^{n-1} \xi_j^2 \sigma^2(\Phi_j)} \right|^2 \quad (6)$$

由于相邻阵列波导长度差 ΔL 与阵列波导长度相比为小量, 通常为几微米到几十微米之间, 所以可以采用线性近似, 令

$$\sigma^2(\Phi_j) = j \frac{\sigma^2(\Phi_{n-1}) - \sigma^2(\Phi_0)}{n-1} + \sigma^2(\Phi_0) \quad (7)$$

所以有

$$|E_{\text{xtalk}}|^2 \approx \sum_{j=0}^{n-1} \eta_j^4 \frac{\sigma^2(\Phi_{n-1}) + \sigma^2(\Phi_0)}{2} = \sum_{j=0}^{n-1} \eta_j^4 \bar{\sigma}^2 \quad (8)$$

其中 $\bar{\sigma}^2$ 是阵列波导相位随机误差的方均差的平均值. 由阵列波导相位误差引入的串扰用 dB 表示为

$$X_{\text{talk}} = 10 \lg |E_{\text{xtalk}}|^2 = 10 \lg \left(\sum_{j=0}^{n-1} \eta_j^4 \bar{\sigma}^2 \right) \text{ (dB)} \quad (9)$$

目前, 制作 AWG 型 DWDM 器件通常采用 Si 基 SiO₂ 波导技术. 制作 Si 基 SiO₂ 波导主要包括以下几个步骤: 在 Si 衬底上制作缓冲层, 在缓冲层上沉积芯层, 制作光刻板, 掩模光刻, RIE 刻蚀制作波导, 沉积上包层. 这些步骤的工艺水平直接影响所制作波导的折射率分布和波导的几何结构形状误差水平. 而引入随机相位误差的主要原因来源于阵列波导几何结构的随机变化和折射率分布的不均匀性^[3]. 反映这些随机变化量主要是两个参数: 随机变化的幅度 σ 和相关长度 L_c ^[6], 如图 2 所示. 在这里只分析两种相关长度: 一种是 $L_c < 1 \mu\text{m}$, 主要反映了刻蚀工艺引入的边界不平整和成膜工艺所引起的折射率分布不均匀; 一种是 L_c 大于阵列波导长度, 主要反映了光刻板的制作缺陷.

先分析 $L_c < 1 \mu\text{m}$ 的情况. 令阵列波导几何结构的随机变化幅度的均方根为 σ_w , 芯层折射率分布均

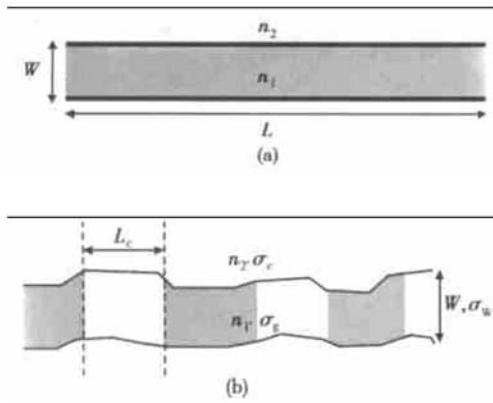


图2 波导模型 (a) 没有工艺误差时的模型; (b) 有工艺误差时的模型

Fig. 2 Model of waveguide (a) without processing errors; (b) with processing errors

方根为 σ_g , 包层折射率分布均方根为 σ_c , 那么各自引入的随机相位误差均方差平均值为^[17]:

$$\bar{\sigma}_w^2 = \left[\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{L} \left| \frac{\partial n_g}{\partial W} \right| \sigma_w \right]^2 \quad (10)$$

$$\bar{\sigma}_g^2 = \left[\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{L} \left| \frac{\partial n_g}{\partial n_1} \right| \sigma_g \right]^2 \quad (11)$$

$$\bar{\sigma}_c^2 = \left[\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{L} \left| \frac{\partial n_g}{\partial n_2} \right| \sigma_c \right]^2 \quad (12)$$

其中 L 为阵列波导的平均长度; n_g, n_1, n_2, W 分别为阵列波导的有效折射率、芯层折射率、包层折射率和宽度。

再分析 L_c 大于阵列波导长度的情况. 制作光刻板时可能会导致各个阵列波导的宽度与所有阵列波导平均宽度之间有一个随机的误差 σ_A , 此时引入的随机相位误差均方差平均值为

$$\bar{\sigma}^2 = \left[\frac{2\pi L}{\lambda} \left| \frac{\partial n_g}{\partial W} \right| \sigma_A \right]^2 \quad (13)$$

根据 (11) ~ (13) 式, 我们可以容易地得到 AWG 型 DWDM 器件制作过程中, 各个相关工艺所引入的阵列波导相位误差的大小, 通过 (9) 式则可得它们对 AWG 型 DWDM 器件串扰水平的影响. 利用这个简洁的方法, 针对 AWG 型 DWDM 器件所要达到的串扰水平, 能够得到对相关制作工艺的要求。

3 设计实例

我们设计了一个 100GHz 通道间隔的 40 通道 AWG 型 DWDM 器件, 并要求其非相邻信道的串扰

水平在 -40dB. 设计中, 阵列波导为截面 $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ 的矩型波导; 在波长 $1.55\mu\text{m}$ 时, 设计的缓冲层以及上包层折射率均为 1.445, 芯层与上包层的相对折射率差为 0.73%; AWG 型 DWDM 器件衍射级数为 25; 具有 C 型的阵列波导结构。

根据上述参数, 经过相关计算, 我们有 $\sum_{j=0}^{n-1} \eta_j^4 \approx 0.003$. 利用上面得到的相关计算公式可以知道, 如果串扰水平要小于 -40dB, 则要求 $\bar{\sigma}^2 < 0.033\text{rad}$. 对于我们设计的 40 通道 AWG 型 DWDM 器件, 当衍射级数为 25 时, 平均阵列波导长度 $L = 24348\mu\text{m}$; 由于 $|\partial n_g / \partial W| = 5.34 \times 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$, $|\partial n_g / \partial n_1| = 0.82$, $|\partial n_g / \partial n_2| = 0.18^{[5]}$, 所以在 $\bar{\sigma}^2 < 0.033\text{rad}$ 条件下要求 $\sigma_w < 0.53\mu\text{m}$, $\sigma_g < 3.5 \times 10^{-4}$, $\sigma_c < 1.6 \times 10^{-3}$. 这些参数对目前标准的 AWG 型 DWDM 器件制作的工艺水平而言是可以达到的。

而根据 (13) 式, 在 $\bar{\sigma}^2 < 0.033\text{rad}$ 条件下则要求光刻板的随机误差 $\sigma_A < 3.4\text{nm}$, 显然这对制版工艺提出了很高要求. 在通常的制作工艺下, σ_A 可达到 10nm 的水平, 此时引入的串扰会达到 -30dB, 这也是目前商用器件所能够达到的最好水平. 因此, 如果希望 AWG 型 DWDM 器件具有良好的串扰水平, 光刻板的随机误差必须得到良好的控制。

4 结论

本文分析了工艺制作过程中引入的阵列波导相位误差以及由其所引起的非相邻通道间串扰性能的劣化, 给出了相应的串扰分析公式. 利用该公式, 可以比较简洁地估算 AWG 型 DWDM 器件非相邻信道间的串扰水平, 从而可以进一步优化 AWG 的设计, 并对相关制作工艺水平提出要求. 根据一个设计实例, 分析了在 -40dB 串扰目标下对波导制作工艺的要求, 进一步验证了该公式的有效性。

参考文献

- [1] Takahashi H, Toba H, Inoue Y. Transmission characteristics of arrayed waveguide $N \times N$ wavelength multiplexer. J Light-wave Technol, 1995, 13(3): 447
- [2] Smit M K, Van Dam C. Phase-based WDM-devices: principles, design and applications. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 1996, 2(2): 236
- [3] Capmany J. Modeling and design of arrayed waveguide grat-

- ing. J Lighthwave Technol, 2002, 20(4): 661
- [4] Guo Wenbin, Ma Chunsheng, Chen Weiyou, et al. Analysis of transmission characteristics of polymer arrayed waveguide grating multiplexer. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(6): 619(in Chinese)[郭文滨, 马春生, 陈维友, 等. 聚合物阵列波导光栅波分复用器传输特性分析. 半导体学报, 2002, 23(6): 619]
- [5] Pan Xiaolong, Zhao Zisen. An optimization method for designing AWG based on BPM. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(1): 78(in Chinese)[潘小龙, 赵梓森. 一种简化的基于 BPM 的 AWG 优化设计方法. 半导体学报, 2002, 23(1): 78]
- [6] Takada K, Yamada H, Inoue Y. Origin of channel crosstalk in 100 GHz-spaced silica-based arrayed-waveguide grating multiplexer. Electron Lett, 1995, 31(14): 1176
- [7] Goh T, Suzuki S, Sugita A. Estimation of waveguide phase error in silica-based waveguide. J Lighthwave Technol, 1997, 15(11): 2107
- [8] Adar R, Henry C H, Dragone C, et al. Broad-band array multiplexers made with silica waveguides on silicon. J Lighthwave Technol, 1993, 11(2): 212

Analysis of Non-Adjacent Channel Crosstalk Level of AWG Device Induced by Random Phase Errors

Li Wei, Liu Deming and Huang Dexiu

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Random phase errors of array waveguides induced by fabrication processing and their affects on crosstalk level of AWG based DWDM demultiplexer between non-adjacent channels are analyzed. A useful formula which can be used to estimate the crosstalk level of AWG devices is given. Using this formula, AWG based DWDM components can be optimized in order to reduce their crosstalk level.

Key words: array waveguide grating; demultiplexer; crosstalk

EEACC: 1320

Article ID: 0253-4177(2003)12-1293-04

Li Wei female, was born in 1968, PhD candidate. She is engaged in the research on optical communication network, systems and the integration technologies for optoelectronic components.

Liu Deming male, was born in 1957, professor, advisor of PhD candidates. His current research field includes optical fiber communication system, subsystem and optoelectronic components.

Huang Dexiu male, was born in 1937, professor, advisor of PhD candidates. His current research field includes optical fiber communication system, subsystem and optoelectronic components.

Received 12 June 2003, revised manuscript received 21 October 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics