

# 硅基二氧化硅阵列波导光栅相位误差数值分析\*

安俊明<sup>1,2</sup> 夏君旨<sup>3</sup> 李 健<sup>1</sup> 郜定山<sup>2</sup> 李建光<sup>2</sup> 王红杰<sup>2</sup> 胡雄伟<sup>2</sup>

(1 内蒙古大学物理系, 呼和浩特 010021)

(2 中国科学院半导体研究所 光电子研究发展中心, 北京 100083)

(3 唐山工业职业技术学院, 唐山 063000)

摘要: 采用传输函数法对硅基二氧化硅阵列波导光栅(AWG)的相位系统误差和随机误差进行了详细的分析. 系统误差的模拟结果表明阵列波导的有效折射率和相邻阵列波导长度差  $\Delta L$  的偏移将会对使中心波长  $\lambda_0$  偏离设计值. 平板波导有效折射率、阵列波导的间距、罗兰圆聚焦长度  $R$  的偏移会使通道间隔偏离设计值. 随机误差的模拟结果表明相邻阵列波导长度差、阵列波导中芯区折射率、芯区宽度、芯区厚度的随机波动对 AWG 的串扰影响较大, 而波导上、下包层折射率的波动对 AWG 串扰影响较小.

关键词: 阵列波导光栅; 串扰; 相位误差; 数值分析

EEACC: 4130

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)S0-0220-05

## 1 引言

随着信息交换的持续增长,大通信容量的传输网络需求变得越来越迫切,密集波分复用系统(DWDM)是提升网络传输能力的最佳方案. 硅基二氧化硅阵列波导光栅(AWG)具有大的输出通道数、低的传输损耗,因而成为 DWDM 系统中的核心器件<sup>[1,2]</sup>. AWG 是一种干涉型器件,对相位的变化极其敏感,当有规律的相位被破坏时,其输出谱将变差. 在最近的几年中,不少研究者对随机性相位误差做了不同的研究,但都是从相位误差的整体出发来讨论对串扰的影响<sup>[3~6]</sup>,尤其是模式折射率  $n_c$  对误差的影响,并没有细化到具体各物理量,如阵列波导的宽度  $w$ 、厚度  $h$ 、芯层折射率  $n_0$ 、上包层折射率  $n_2$ 、

下包层折射率  $n_1$  各参数的波动. 本文在光程误差的基础上,将决定光程误差的几个典型参数进行细化,进一步分析这些参数的随机性对 AWG 器件的输出波谱的影响,所得的结果更接近于具体工艺,为 AWG 器件制备中工艺误差控制提供理论依据.

## 2 理论模型

### 2.1 AWG 系统误差分析理论基础

在进行相位误差对输出谱的影响的分析时,可以不考虑插损,所以可用简单传输函数来评估相位误差对输出谱的影响. 在系统误差分析时只需在关键常数上附加一偏离值即可,具体见(1)式<sup>[7]</sup>:

$$T = \frac{\left| \sum_{j=-M}^M \rho_g(j, 0)^2 \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} \left[ j(n_s + \Delta(n_s))(d + \Delta d) \left( o \frac{d + \Delta d}{R + \Delta R} \right) + j(n_c + \Delta n_c)(\Delta L + \Delta(\Delta L)) \right] \right\} \right|^2}{\left| \sum_{j=-M}^M \rho_g(j, 0)^2 \right|^2} \quad (1)$$

\* 国家重点基础研究发展规划(批准号:G2000036602)和国家自然科学基金(批准号:69889701)资助项目

安俊明 男,1969 年出生,博士,现从事硅基二氧化硅阵列波导光栅的研究.

2004-11-08 收到,2004-12-17 定稿

$$\text{loss(dB)} = 10\lg T \quad (2)$$

其中  $\rho_g(j, 0)$  为功率分布函数, 本文取高斯分布;  $n_s, R, d, n_c, \Delta L$  分别为 AWG 平板波导有效折射率、罗兰圆聚焦长度、阵列波导的间距、阵列波导的有效折射率、相邻阵列波导长度差, 相应的偏离量分别为  $\Delta n_s, \Delta R, \Delta d, \Delta n_c$  和  $\Delta(\Delta L)$ 。

## 2.2 AWG 随机误差分析理论基础

$$T = \frac{\left| \sum_{j=-M}^M \rho_g(j, 0)^2 \exp\left\{i \frac{2\pi}{\lambda} [j(n_c \Delta L + \text{rad}(a(j)))]\right\} \right|^2}{\left| \sum_{j=-M}^M \rho_g(j, 0)^2 \right|^2} \quad (3)$$

AWG 制备的工艺误差是一种随机、无规律的因素。这种无规律性可破坏相邻阵列波导固定的光程差  $n_c \times \Delta L$ , 在只分析中心通道输出谱时, 表达式为(3)式, 在相邻阵列波导光程差中引入随机的光程波动  $\text{rad}(a(j))$ , 这一随机项的引入可使输出谱的旁瓣变大, 增加串扰。在模拟中随机光程随机项  $\text{rad}(a(j))$  服从正态分布:

$$a(j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

其中  $\mu$  为均值;  $\sigma$  为标准偏差。在实际的输出谱分析中, 将光程的随机项只做为一个变量来分析是不详尽的。因为影响这一随机量的有相邻阵列波导的长度差  $\Delta L$ 、芯区宽度  $w$ 、芯区厚度  $h$ 、芯区折射率  $n_0$ 、上包层的折射率  $n_2$  和下包层折射率  $n_1$  的随机波动, 如图 1 所示, 在工艺中其中任何一个物理量的波动都会引入与其相应相位误差。因此在本文的随机误差分析中, 随机量将具体表现为上述六个物理量的波动, 这在以前的文献报道中是没有的。其关系式为:

$$T = \left| \sum_{j=-M}^M \rho_g^2(j, 0) \times \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} \{ [j(n_{c_j} + \text{rad}(n_{c_j}(w)) + \text{rad}(n_{c_j}(h)) + \text{rad}(n_{c_j}(n_0)) + \text{rad}(n_{c_j}(n_2)) + \text{rad}(n_{c_j}(n_1))) \times (\Delta L_j + \text{rad}(\Delta L_j))] \} \right) \right|^2 \quad (5)$$

这样对工艺波动的表述更接近器件的真实情况, 其中  $\Delta L, w, h, n_0, n_2$  和  $n_1$  的随机值  $\text{rad}(\Delta L), \text{rad}(w), \text{rad}(h), \text{rad}(n_0), \text{rad}(n_2)$  和  $\text{rad}(n_1)$  的产生采用 Matlab 中的 `normrnd` 函数, 随机值满足正态

分布。

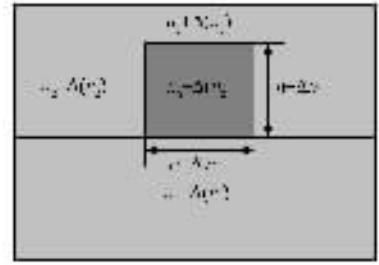


图 1 波导示意图

Fig. 1 Diagram of waveguide

## 3 模拟结果及讨论

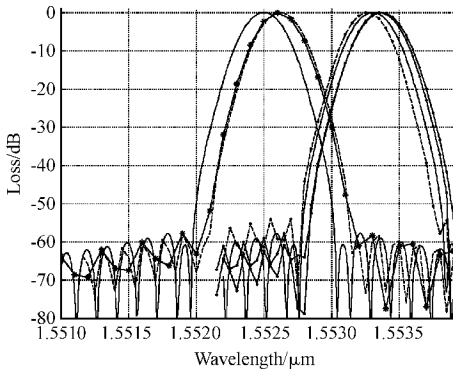
### 3.1 折射率差为 0.75% AWG 的相位系统误差分析

本文对相位误差的分析是针对折射率差为 0.75%, 通道数为 16 的硅基二氧化硅 AWG, 其设计参数如表 1 所示<sup>[8]</sup>。图 2 是 16 通道 AWG 在中心波长处的理想输出谱与  $n_s, d, R, n_c$  和  $\Delta L$  分别偏离表 1 设计值 0.1,  $1\mu\text{m}, +500\mu\text{m}, +0.0001$  和  $+0.010\mu\text{m}$  的输出谱比较, 其中实线为理想的输出谱, 在  $1.5525\mu\text{m}$  附近带星号线为  $n_c$  偏离设计值  $+0.0001$  的输出谱, 虚线为  $\Delta L$  偏离设计值  $+0.010\mu\text{m}$  的输出谱, 在  $1.5533\mu\text{m}$  附近带实星黑点线从左到右分别为  $R$  偏离设计值  $+500\mu\text{m}, n_s$  偏离设计值 0.1 和  $d$  偏离设计值  $+1\mu\text{m}$  的输出谱。由图可知当各参数为理想设计值时, 输出谱正好在中心波长  $1.5525\mu\text{m}$  处出现峰值, 且通道间隔为  $0.8\text{nm}$ , 但当模式折射率  $n_c$  偏离理想值  $+0.0001$  时, 输出谱的峰值将会偏离设计的中心波长, 向长波方向移动, 发生红移, 偏离值为  $+0.1\text{nm}$ ; 当  $\Delta L$  偏离设计值  $+0.01\mu\text{m}$  时, 输出谱的峰值偏离设计的中心波长, 也发生红移, 偏离值约为  $+0.1\text{nm}$ 。  $n_s, d$  和  $R$  的偏离不会对中心波长产生影响, 但使通道间隔偏离设计值。当  $n_s$  和  $d$  分别偏离 0.1 和  $1\mu\text{m}$  时, 通道间隔均增大约  $0.06\text{nm}$ , 当  $R$  偏离  $+500\mu\text{m}$  时, 通道间隔小于设计值, 减小量约为  $0.05\text{nm}$ 。由此可知,  $n_c$  和  $\Delta L$  的偏离对中心波长产生极为敏感的影响, 需精确地控制; 而  $n_s, d$  和  $R$  对输出谱的中心波长无影响, 只对通道间隔产生影响, 且影响较小, 要求较为宽松。

表1 16通道AWG设计参数

Table 1 Design parameters of AWG with 16 channels

芯区尺寸	通道数	通道间隔 /nm	中心波长 / $\mu\text{m}$	衍射级数	$\Delta L$ / $\mu\text{m}$	$R$ / $\mu\text{m}$	阵列波导数
$6\mu\text{m}\times 6\mu\text{m}$	16	0.8	1.5525	120	128.423	9419.4	85

图2 16通道AWG理想输出谱与 $n_s, R, d, n_c, \Delta L$ 偏离设计值的输出谱比较Fig. 2 Comparison between ideal output spectra and the spectra with  $n_s, R, d, n_c, \Delta L$  deviation

### 3.2 AWG 相位随机误差分析

AWG 相位随机误差是影响器件串扰的主要因素,其来源于器件制备中工艺的不稳定,具体包括  $\Delta L, w, h, n_0, n_2$  和  $n_1$  的随机波动,其中后五项在 AWG 的相位中表现为  $n_c$  的波动.在波动较小时,  $n_c$  与这五个量近似为线性关系,其计算采用束传播方法<sup>[9]</sup>.

$\Delta L$  的波动主要来自掩膜版的分辨率<sup>[4]</sup>,目前制版分辨率有 100, 50 和 25nm,它们所对应的  $\Delta L$  波动标准偏差  $\sigma$  是分辨率乘以一个拟合因子,根据工艺的不同,拟合因子在 0.5~0.7,本文取 0.5,则以上四种分辨率对应的  $\Delta L$  的标准偏差为 50, 25 和 12.5nm.图 3(a)给出了这三种标准偏差下的中心波长输出谱,由图可知串扰分别为 -15, -25 和 -28dB,要想得到串扰小于 -25dB 的 AWG 器件,在 AWG 制版时需选用分辨率小于 50nm 的制版设备.

决定  $n_c$  波动有五个物理量,波导厚度  $h$  和宽

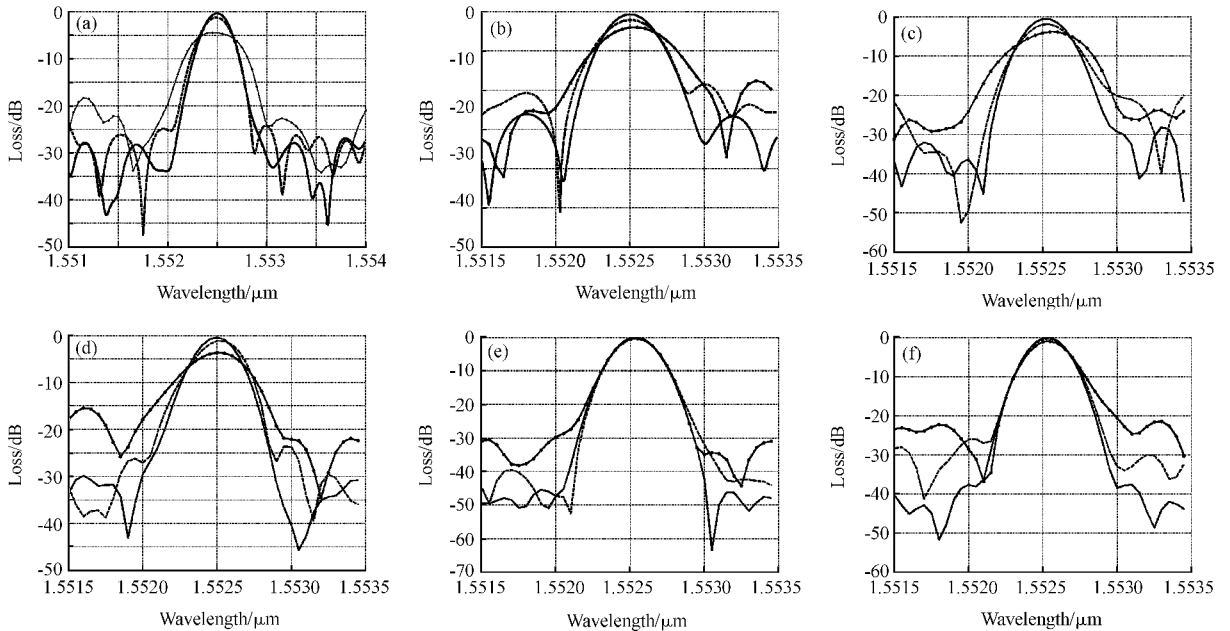


图3  $\Delta L, w, h, n_0, n_2$  和  $n_1$  随机波动对 AWG 串扰的影响 (a) 实线、虚线和实星黑点线分别表示  $\Delta L$  的标准偏差为 50, 25 和 12.5nm; (b) 实线、虚线和实星黑点线分别表示  $h$  的标准偏差为 0.1, 0.2 和 0.3 $\mu\text{m}$ ; (c) 实线、虚线和实星黑点线分别表示  $w$  的标准偏差为 0.1, 0.2 和 0.3 $\mu\text{m}$ ; (d) 实线、虚线和实星黑点线分别表示  $n_0$  的标准偏差为  $5\times 10^{-5}, 1\times 10^{-4}, 2\times 10^{-4}$ ; (e) 实线、虚线和实星黑点线分别表示  $n_1$  的标准偏差为  $1\times 10^{-4}, 5\times 10^{-4}, 1\times 10^{-3}$ ; (f) 实线、虚线和实星黑点线分别表示  $n_2$  的标准偏差为  $1\times 10^{-4}, 3\times 10^{-4}, 5\times 10^{-4}$ .

Fig. 3 Influence on AWG crosstalk of  $\Delta L, w, h, n_0, n_2$ , and  $n_1$  fluctuation (a)  $\Delta L$  standard deviations of solid line, dashed line and solid line with black dot are 50, 25 and 12.5nm, respectively; (b)  $h$  standard deviations of solid line, dashed line and solid line with black dot are 0.1, 0.2 and 0.3 $\mu\text{m}$ , respectively; (c)  $w$  standard deviations of solid line, dashed line and solid line with black dot are 0.1, 0.2 and 0.3 $\mu\text{m}$ , respectively; (d)  $n_0$  standard deviations of solid line, dashed line and solid line with black dot are  $5\times 10^{-5}, 1\times 10^{-4}, 2\times 10^{-4}$ , respectively; (e)  $n_1$  standard deviations of solid line, dashed line and solid line with black dot are  $1\times 10^{-4}, 5\times 10^{-4}, 1\times 10^{-3}$ , respectively; (f)  $n_2$  standard deviations of solid line, dashed line and solid line with black dot are  $1\times 10^{-4}, 3\times 10^{-4}, 5\times 10^{-4}$ , respectively

度  $w$  的随机波动分别来源于生长芯层和刻蚀芯层时工艺的波动,图 3(b),(c)分别是  $h$  和  $w$  在不同标准偏差下对器件串扰的影响,要保证在输出谱中小于  $-25\text{dB}$  的串扰,标准偏差应小于  $0.1\mu\text{m}$ . 芯层折射率  $n_0$  的波动也是由生长芯层的工艺波动引起,图 3(d)为芯区折射率  $n_0$  波动对 AWG 输出谱的影响. 要使串扰控制在  $-25\text{dB}$  以下,芯层的折射率波动的标准偏差应控制在  $1 \times 10^{-4}$ . 这说明在生长和刻蚀芯区时,对工艺要求是很严格的.

图 3(e),(f)分别是阵列波导下包层和上包层折射率波动对 AWG 输出谱的影响. 与芯层折射率波动相比,对包层的折射率控制要求不高,在包层折射率波动为  $1 \times 10^{-4}$  时,几乎不对串扰造成影响,分别可保持在  $-45$  和  $-38\text{dB}$  以下. 满足商用器件的  $-25\text{dB}$  要求时,对下包层折射率波动的标准偏差可高达  $1 \times 10^{-3}$ ,对上包层折射率标准偏差也可达  $3 \times 10^{-4}$ . 这说明在制备 AWG 器件时对上、下包层的要求是较宽松的,工艺中容易满足.

## 4 结论

通过对相位系统误差分析,设计的  $n_c, \Delta L$  值与真实值的偏差会使输出谱的中心波长偏移,要使中心波长偏移小于  $0.1\text{nm}$ ,其相应偏移量应小于  $0.0001$  和  $0.010\mu\text{m}$ ,这一要求是比较苛刻的; $n_s, d$  和  $R$  与真实值的偏移会使通道间隔偏离设计值,但这一设计容差较大,在设计中可以满足要求.

对相位随机误差的模拟结果表明,在 AWG 传输谱中, $\Delta L, w, h, n_0$  的波动对其串扰影响较大. 要保证串扰小于  $-25\text{dB}$  的 AWG, $\Delta L, w, h, n_0$  的波动标准偏差应分别小于  $50\text{nm}, 0.1\mu\text{m}, 0.1\mu\text{m}$  和

$0.0001$ ,这对工艺要求是比较苛刻的. 而对上下包层折射率的波动要求宽松,一般工艺即可满足.

## 参考文献

- [1] Hida Y, Hibino Y, Kitoh M T, et al. 400-channel 25-GHz spacing arrayed waveguide grating covering a full range of C- and L- bands. Proc OFC, 2001: WB2
- [2] Hibino Y. Recent advances in high-density and large-scale AWG multi/demulti-plexers with higher index-contrast silica-based PLCs. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2002, 8(6): 1090
- [3] Kamalakis T, Sphicopoulos T, Syvridis D. An estimation of performance degradation due to fabrication errors in AWGs. J Lightwave Technol, 2002, 20(9): 1779
- [4] Lee C D, Chen Wei, Wang Qiang. The role of photomask resolution on the performance of arrayed-waveguide grating devices. J Lightwave Technol, 2001, 19(11): 1726
- [5] Chu Yuanliang, Zheng Xiaoping, Zhang Hanyi, et al. The impact of phase errors on arrayed waveguide gratings. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2002, 8(6): 1122
- [6] Muñoz P, Pastor D, Capmany J, et al. Analytical and numerical analysis of phase and amplitude errors in the performance of arrayed waveguide gratings. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2002, 8(6): 1130
- [7] Adar R, Henry C H, Dragone C, et al. Broad-band array multiplexers made with silica waveguides on silicon. J Lightwave Technol, 1993, 11(2): 212
- [8] Kaneko A, Goh T, Yamada H, et al. Design and applications of silica-based planar lightwave circuits. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 1991, 5(5): 1227
- [9] Hadley G R, Smith R E. Full-vector waveguide modeling using an iterative finite-difference method with transparent boundary conditions. IEEE J Lightwave Technol, 1995, 13(3): 465

# Numerical Analysis for Phase Error of Silica-Based Arrayed Waveguide Grating\*

An Junming<sup>1,2</sup>, Xia Junzhi<sup>3</sup>, Li Jian<sup>2</sup>, Gao Dingshan<sup>2</sup>, Li Jianguang<sup>2</sup>,  
Wang Hongjie<sup>2</sup>, and Hu Xiongwei<sup>2</sup>

(1 *Department of Physics, Inner Mongolian University, Hohhot 010021, China*)

(2 *R&D Center for Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(3 *Tangshan Industrial Vocational Technology College, Tangshan 063000, China*)

**Abstract:** Phase systematical and random errors of silica-based AWG are analyzed in detail using transmission function method. The results of systematical error analysis show that the deviation from designed values of effective refraction index and path difference of arrayed waveguides makes central wavelength deviate from designed value, and the deviation of the effective refractive index of slab waveguides, the pitch of arrayed waveguides and the focal length makes channel spacing deviate from designed value. The results of random error analysis show that the fluctuation of path difference, core refractive index, width and height of core impacts on crosstalk more than that of undercladding and overcladding refractive index.

**Key words:** arrayed waveguide grating; crosstalk; phase error; numerical analysis

**EEACC:** 4130

**Article ID:** 0253-4177(2005)S0-0220-05

---

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(No. G2000036602) and the National Natural Science Foundation of China(No. 69889701)

An Junming male, was born in 1969, PhD. His research interest lies in silica AWG on silicon.

Received 8 November 2004, revised manuscript received 17 December 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics