

文章编号: 0258-7025(2010)02-0454-06

# 新型阵列波导光栅的分析与优化

王有斌 黄旭光

(华南师范大学信息光电子科技学院光子信息技术广东省高校重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘要** 对一种新型结构的阵列波导光栅(AWG)进行分析,该阵列波导光栅具有非弯曲的阵列波导,使用两个渐变的折射率平板波导(GISLAB)分别作为阵列波导光栅的输入与输出。该器件在制备粗波分复用器件(CWDM)时可有效减小器件尺寸。利用傅里叶光学和波动光学理论建立数学模型,设计了非对称结构的 AWG,其背景噪声比对称结构的 AWG 降低了 20 dB,并可提高频谱宽度。利用反射镜和阵列波导光栅的路由特性设计了反射式阵列波导光栅,进一步减小了器件的尺寸。

**关键词** 傅里叶光学;阵列波导光栅;粗波分复用;非对称

中图分类号 TN25 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0454

## Analysis and Optimum of a Novel Arrayed-Waveguide Grating

Wang Youbin Huang Xuguang

(Guangdong Provincial University Key Laboratory of Photon Information Technology, School of Information and Photoelectronic Science and Technology, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**Abstract** A novel arrayed-waveguide grating (AWG) based on unbent waveguides is analyzed. The arrayed waveguides are replaced by unbent waveguides and two graded-index planar waveguides (GISLAB) are used as input and output planar waveguides, respectively. This design can decrease the size of the coarse wavelength division multiplexing (CWDM) effectively. A mathematical model of the AWG is established based on the theory of Fourier optics and wave optics, with reasonable parameters considering every factor. The novel arrayed waveguide grating with asymmetric focal lengths of GISLABs is discussed, whose background noise is degraded by 20 dB with respect to the symmetrical structure, and which will widen spectral width. The method of reducing the size further with a reflector and the property of the routing is designed.

**Key words** Fourier optics; arrayed-waveguide grating; coarse wavelength division multiplexing; asymmetric

## 1 引言

由于阵列波导光栅(AWG)器件在密集波分复用(DWDM)光通信网络中的广泛应用,使得 AWG 器件的研究得到了迅速的发展<sup>[1~4]</sup>。阵列波导光栅作为波长滤波器,以其低插入损耗、高稳定性、易于大规模制作、潜在的低制作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>[5,6]</sup>。对阵列波导光栅的结构设计、优化加工、材料选取(已从硅基

AWG 发展到 InP 基和聚合物基 AWG)、制备方法和工艺精度等方面进行了不懈的研究与创新<sup>[7~12]</sup>。对于常规的 AWG,使用弯曲的阵列波导引入相邻波导的相位差,这样会增大 AWG 的体积,同时带来弯曲损耗<sup>[13,14]</sup>。最近 Ping Lu 等<sup>[15]</sup>提出了一种尝试,本文在使用傅里叶光学和波动光学理论分析该结构并推导出频谱响应的解析式的基础上,进一步提出和研究了非对称和反射式的结构,以便充分发

收稿日期: 2008-12-10; 收到修改稿日期: 2009-05-09

基金项目: 广东省自然科学基金(05200534)和广州科技计划(2006J12C0461)资助课题。

作者简介: 王有斌(1984—),男,硕士研究生,主要从事无源光通信器件及光纤传感等方面的研究。

E-mail: wyb\_adam@163.com

导师简介: 黄旭光(1962—),男,教授,硕士生导师,主要从事微纳集成光通信器件及光纤传感等方面的研究。

E-mail: huangxg0@163.com(通信联系人)

挥该种结构的优点。该 AWG 器件具有非弯曲的阵列波导,取代了以前的弯曲波导,并使用两个渐变的折射率平板波导(GISLAB)分别作为阵列波导光栅的输入与输出,这样的结构相对简单并且容易制作。此 AWG 的阵列波导和平板波导的制作工艺可以选用紫外光(UV)写入技术。

本文根据傅里叶光学和波动光学的理论建立了数学模型,推导出新型阵列波导光栅输出频谱的解析式。讨论了两 GISLAB 的焦距不对称性对输出频谱的影响。设计和分析了尺寸更小的反射式 AWG 结构。

## 2 新型阵列波导光栅的结构和理论分析

新型阵列波导光栅如图 1 所示,两个折射率渐变平板波导分别用来连接输入波导和阵列波导的输入面以及输出波导和阵列波导的输出面。折射率渐

变平板波导的制作可以用高精度的紫外光写入技术,精确控制各区域的紫外光照射光强来实现。其功能与透镜的傅里叶变换功能一样。所以在前一个 GISLAB 的输出端,光束接近平行地射入阵列波导,使各个阵列波导中光束的初相位相等。对于具有阶梯型折射率阵列波导的制作方法,也是使用紫外光写入技术。首先用紫外光直接写每根波导,使得每根阵列波导有  $n_2$  的有效折射率,然后在相应位置再重复写,得到  $n_2'$  的有效折射率,但每根波导写入的相邻长度差是  $\Delta L$ ,如图 1 所示。相邻波导的长度差  $\Delta L$  需要满足

$$\Delta n_{\text{eff}} \times \Delta L = m \times \lambda_0, \quad (1)$$

其中  $\Delta n_{\text{eff}} = n_2' - n_2$ ,为两种有效折射率差, $m$  是衍射级数, $\lambda_0$  是 AWG 的中心波长。该器件以直波导代替弯曲波导,可减小损耗,同时在制备粗波分复用器件(CWDM)时可有效减小器件尺寸。

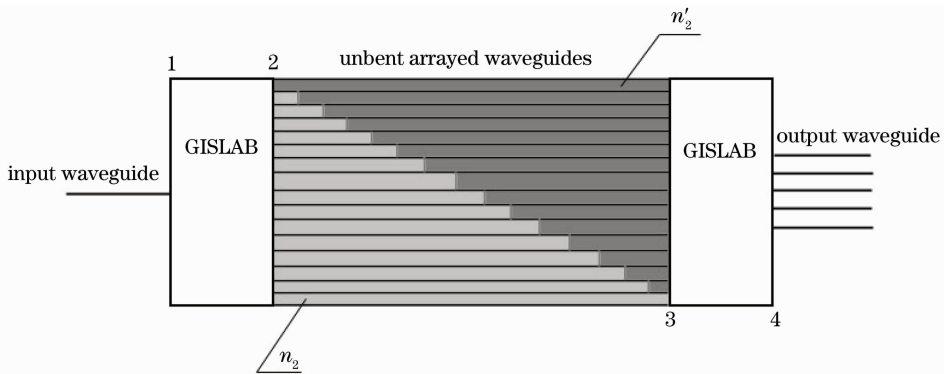


图 1 新型阵列波导光栅结构

Fig.1 Structure of the novel AWG

由于 AWG 输入波导的模场可以用归一化高斯光束做很好的近似<sup>[16~18]</sup>,因此在界面 1 的光强可以表示为

$$E_1(x_1) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_1^2}} \exp\left[-\left(\frac{x_1}{\omega_1}\right)^2\right], \quad (2)$$

式中  $\omega_1$  为界面 1 的输入波导的模场半径。因为 GISLAB 的功能与透镜相同,所以当出射光在透镜的前焦面上时,在透镜的后焦面上将获得出射光的傅里叶变换<sup>[19]</sup>

$$E_2(x_2) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \mathcal{F}[E_1(x_1)] = \sqrt{\frac{2\pi\omega_1^2}{\alpha^2}} \exp\left[-\left(\frac{\pi\omega_1 x_2}{\alpha}\right)^2\right], \quad (3)$$

式中  $\alpha = \lambda f$  为引入的归一化常数, $f$  为 GISLAB 的焦距, $\lambda$  为入射光所包含的任意波长分量。对于任意第  $k$  根阵列波导的模场横向分布可以用归一化高斯

函数很好地近似,

$$g_a(x_2 - kd_a) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_a^2}} \exp\left[-\left(\frac{x_2 - kd_a}{\omega_a}\right)^2\right], \quad (4)$$

式中  $\omega_a$  为界面 2 的输入波导模场半径, $d_a$  为相邻阵列波导的间距。 $k=0$  对应中心位置处的阵列波导, $k$  为正整数,对应于正半坐标轴上的波导, $k$  为负整数,对应于负半坐标轴上的波导,输出波导数  $q$  用类似的规定。将输入平板波导的出射光场和阵列波导的基模场的乘积进行积分,并考虑到相邻波导模场的交叠,可得到第  $k$  根阵列波导的光场耦合系数

$$C_k = \frac{E_2(kd_a)}{1 + 2 \int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2)g_{k-1}(x_2)dx_2} \int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2)dx_2, \quad (5)$$

式中  $\int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2)g_{k-1}(x_2)dx_2$  和  $\int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2)dx_2$  是常量,即  $C_k$  与  $E_2(x_i)$  是线性关系。

阵列波导与输出平面波导界面上的总光场分布是

$$E_3(x_3) = \sum_k C_k g_k(x_3 - kd_a) \exp(-j\varphi_{k,\lambda}), \quad (6)$$

式中  $\varphi_{k,\lambda}$  为第  $k$  根阵列波导的相位。光从入口端传到出口端引入的相邻波导的相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}} \times \Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} (n'_2 - n_2) \times \Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} m \times \lambda_0, \quad (7)$$

所以可以得到每个阵列波导对应的相位为

$$\varphi_{k,\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} [n_2 l_1 + (k-1)m\lambda_0], \quad (8)$$

其中  $l_1$  为第 1 根阵列波导的长度。

根据前面的分析可知,光在平板波导区的输出光场正好是输入光场的能量归一化空间傅里叶变换,将(6)式进行傅里叶变换得到输出平板波导焦平面的光场分布为

$$E_4(x_4) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \mathcal{F}[E_3(x_3)] = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2) dx_2}{1 + 2 \int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2) g_{k+1}(x_2) dx_2} \sqrt{\frac{4\pi^2 \omega_i^2 \omega_a^2}{\alpha^4} \exp\left(-\frac{\pi^2 \omega_a^2 x_4^2}{\alpha^2}\right)} \times \sum_k \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} [n_2 l + (k-1)m\lambda_0]\right\} \exp\left[-\left(\frac{\pi \omega_i k d_a}{\alpha}\right)^2\right] \exp\left(-j \frac{2\pi k d_a x_4}{\alpha}\right). \quad (9)$$

由于各输出波导间距较远而且彼此完全分立,波导模场几乎没有交叠,积分区间可取无穷,那么第  $q$  根输出波导的光场耦合系数为

$$\eta_{(0,q)} = \int_{-\infty}^{+\infty} E_4(x_4, \lambda) g_o(x_4 - qd_o) dx_4, \quad (10)$$

其中  $g_o(x_4 - qd_o)$  为第  $q$  根输出波导模场横方向分布,所以第  $q$  根输出波导的输出能量为

$$P_{(0,q)} = |\eta_{(0,q)}|^2 = \frac{2\omega_i \omega_a \omega_o \pi \sqrt{2\pi}}{\pi^2 \omega_o^2 \omega_a^2 + \alpha^2} \left[ \frac{\int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2) dx_2}{1 + 2 \int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2) g_{k-1}(x_2) dx_2} \right]^2 \exp\left(\frac{-2\pi^2 \omega_a^2 d_o^2 q^2}{\pi^2 \omega_a^2 \omega_o^2 + \alpha^2}\right) \times \left| \sum_k \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} [n_2 l + (k-1)m\lambda_0]\right\} \exp\left[-\left(\frac{\pi \omega_i d_a k}{\alpha}\right)^2 - \frac{\pi^2 \omega_o^2 d_a^2 k^2 + j2\pi \alpha q d_a d_o k}{\pi^2 \omega_a^2 \omega_o^2 + \alpha^2}\right] \right|^2, \quad (11)$$

即为新型阵列波导光栅的频谱响应的解析式。

### 3 非对称阵列波导光栅理论与方案选择

前面讨论新型 AWG 是基于左右对称的 GISLAB 构成,而左右不对称的 AWG 对频谱产生的影响则较少被人们讨论。那么(9)式和(11)式在不对称结构的情况下分别变为<sup>[20]</sup>:

$$E_4(x_4) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2) dx_2}{1 + 2 \int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2) g_{k+1}(x_2) dx_2} \sqrt{\frac{4\pi^2 \omega_i^2 \omega_a^2}{\alpha_1^2 \alpha_2^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 \omega_a^2 x_4^2}{\alpha_2^2}\right)} \times \sum_k \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} [n_2 l + (k-1)m\lambda_0]\right\} \exp\left[-\left(\frac{\pi \omega_i k d_a}{\alpha_1}\right)^2\right] \exp\left(-j \frac{2\pi k d_a x_4}{\alpha_2}\right), \quad (12)$$

$$P_{(0,q)} = |\eta_{(0,q)}|^2 = \frac{2\omega_i \omega_a \omega_o \pi \alpha_2 \sqrt{2\pi}}{\alpha_1 (\pi^2 \omega_o^2 \omega_a^2 + \alpha_2^2)} \left[ \frac{\int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2) dx_2}{1 + 2 \int_{-\infty}^{\infty} g_k(x_2) g_{k-1}(x_2) dx_2} \right]^2 \exp\left(\frac{-2\pi^2 \omega_a^2 d_o^2 q^2}{\pi^2 \omega_a^2 \omega_o^2 + \alpha_2^2}\right) \times \left| \sum_k \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} [n_2 l + (k-1)m\lambda_0]\right\} \exp\left[-\left(\frac{\pi \omega_i d_a k}{\alpha_1}\right)^2 - \frac{\pi^2 \omega_o^2 d_a^2 k^2 + j2\pi \alpha_2 q d_a d_o k}{\pi^2 \omega_a^2 \omega_o^2 + \alpha_2^2}\right] \right|^2, \quad (13)$$

式中  $\alpha_1 = \lambda f_1, \alpha_2 = \lambda f_2, f_1$  和  $f_2$  分别为两个不同 GISLAB 的焦距。由(12)式可知,  $f_2$  会影响到输出平板波导焦平面的光场最大值的分布, 因此若使其他参数不变而仍让各个波长与输出端相对应, 可以只改变  $f_1$  的值。从图 2 可以看到, 当  $f_1 < f_2$  时, 中心频谱会变宽, 但是旁瓣功率会很小, 因为当  $f_1$  比较小时, 入射光在平板波导部分发散较少, 相对有更多的光被阵列波导收集, 所以插入损耗小, 而且大部分光强集中在中心。相反, 当  $f_1 > f_2$  时, 中心频谱会变窄, 但是旁瓣功率会很大。经过比较, 设计  $f_1 < f_2$  可以提高器件的频谱宽度与串扰特性。图 3 是信道波长间隔为 20 nm 的 8 信道非对称 AWG 频谱特性, 具体的参数如表 1 所示。由  $\alpha_1 = \lambda f_1$  可以知道, 由于  $f_1$  此时比较小, 所以  $\lambda$  的变化将会影响到(13)式中  $\exp[-(\pi w_i d_a k / \alpha_1)^2]$  的值, 造成如图 3 中较明显的不对称的频谱响应。由图 3 可知, 非对称结构的 AWG 的背景噪声比对称结构的 AWG 降低了 20 dB, 并提高了频谱宽度, 因此非对称  $f_1 < f_2$  的 AWG 比对称的 AWG 具有明显的优势。

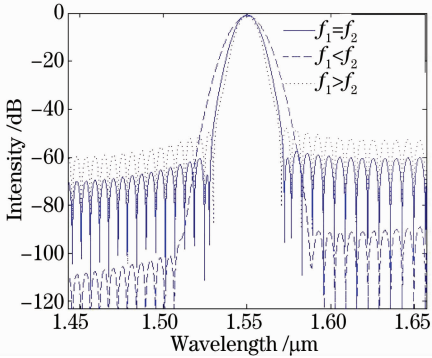


图 2 新型非对称阵列波导光栅应用于 CWDM 的频谱图

Fig. 2 Response of the novel asymmetric AWG in CWDM

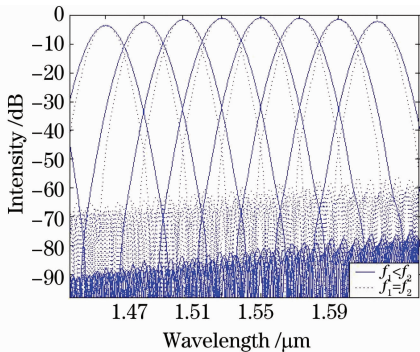


图 3 新型非对称阵列波导光栅  $f_1 < f_2$  应用于 CWDM 的频谱图

Fig. 3 Response of the novel asymmetric AWG  $f_1 < f_2$  in CWDM

表 1 新型非对称 AWG 应用于 CWDM 的参数

Table 1 Parameters of a novel asymmetric AWG in CWDM

Parameter	Value
Central wavelength $\lambda_0/\text{nm}$	1550
Effective index of the arrayed waveguides written once $n_2$	1.453
Effective index of the arrayed waveguides written twice $n'_2$	1.46753
Spacing of AWs $d_a/\mu\text{m}$	18
Spacing of OWs $d_o/\mu\text{m}$	23
Focal length of the GISLAB1 waveguide $f_1/\mu\text{m}$	1850
Focal length of the GISLAB2 waveguide $f_2/\mu\text{m}$	2586
Number of AWs $N$	31
Half of width of IWs $a/\mu\text{m}$	7
Width of OWs $w_o/\mu\text{m}$	10
Diffraction order $m$	8
Width of AWs $w_a/\mu\text{m}$	10
Number of output channels $N_o$	8
Length difference between two neighboring AWs $\Delta L/\mu\text{m}$	12.4

## 4 反射式阵列波导光栅理论分析与方案选择

为了进一步减小尺寸, 在阵列波导区的中央加上一高反镜组成反射式 AWG。则可省掉后半部分的阵列波导和一个 GISLAB, 减小了几乎一半的面积。经过适当调节自由光谱范围(FSR)的值, 并且增加一个不使用的通道, 可以充分利用界面 1 的位置并降低损耗, 实现宽度窄、损耗低的反射式 AWG。

设计反射式 AWG 仍然选择 CWDM 系统的 S+C+L-band, 但此时需要让 FSR 为 180 nm, 即增加一个不使用的 1450 nm 或 1630 nm 的通道, 让输入波导能输出此波长的光, 从而保证其他使用波长的光能从输出波导输出, 如图 4 所示, 具体的参数如表 2 所示。通过对(9)式的分析, 可以得到界面 4 的光强最大值的位置为

$$x_{\max 4} = -\frac{\alpha}{d_a} \left( \frac{m\lambda_0}{\lambda_0 + \Delta\lambda} - 1 - k \right) = \frac{\alpha m \Delta\lambda}{d_a (\lambda_0 + \Delta\lambda)} + \frac{\alpha}{d_a} k = \frac{R\lambda m \Delta\lambda}{d_a n_s (\lambda_0 + \Delta\lambda)} + \frac{R\lambda}{d_a n_s} k = \frac{Rm \Delta\lambda}{d_a n_s} + \frac{R\lambda}{d_a n_s} k, \quad (14)$$

式中  $k$  为整数, 可以看到, 在界面 4 的相邻光强最大值的距离为  $R\lambda/(d_a n_s)$ , 而当波长变化时, 最大值的移动距离是  $Rm\Delta\lambda/(d_a n_s)$ , 因此自由光谱范围  $R_{fs} = \lambda/m$ 。不同波长的频率响应周期是不同的, 因此选择一个相

对合理的衍射级  $m=8$ , 使它们的差别降低到最小。经过理论分析和尝试, 如图 5 的波导分配方式可以实现等间隔的输出波导和较小的损耗, 其中心波长  $\lambda_0 =$

1630 nm。图 6 为该设计的频谱响应, 可以看到, 该设计可以很好地实现粗波分复用, 并且实现了较高的通道利用率。

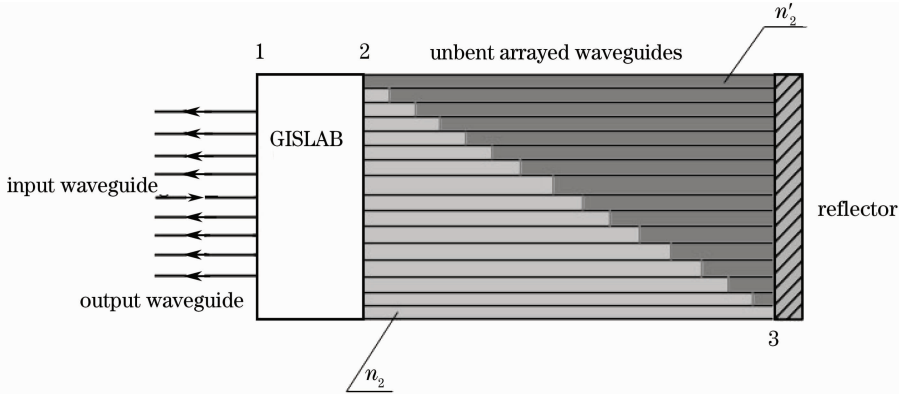


图 4 新型反射式阵列波导光栅结构(选择合理的 FSR)

Fig. 4 Structure of the novel reflective AWG (choose reasonable FSR)

表 2 新型反射式阵列波导光栅参数

Table 2 Parameters of the novel one-sided AWG

Parameter	Value
Central wavelength $\lambda_0/\text{nm}$	1630
Effective index of the arrayed waveguides written once $n_2$	1.453
Effective index of the arrayed waveguides written twice $n_2'$	1.46753
Spacing of AWs $d_a/\mu\text{m}$	18
Spacing of OWs $d_o/\mu\text{m}$	25
Focal length of the GISLAB waveguide $f/\mu\text{m}$	2586
Number of AWs $N$	31
Half of width of IWs $a/\mu\text{m}$	7
Width of OWs $w_o/\mu\text{m}$	10
Diffraction order $m$	8
Width of AWs $w_a/\mu\text{m}$	10
Number of output channels $N_o$	8
Length difference between two neighboring AWs $\Delta L/\mu\text{m}$	12.4

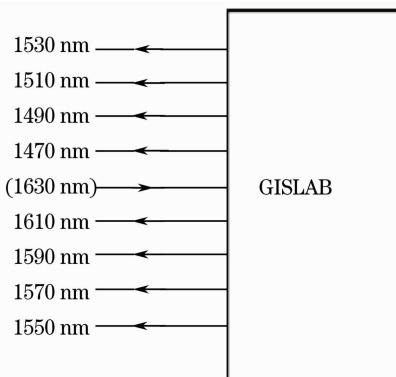


图 5 新型反射式阵列波导光栅端口分布

Fig. 5 Port distribution of the novel reflective AWG

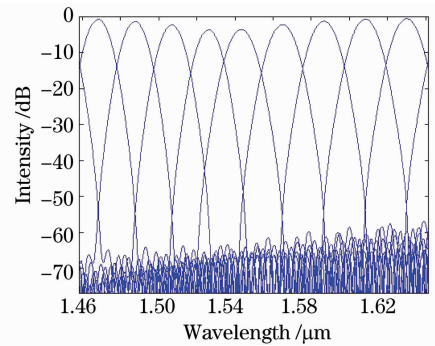


图 6 新型反射式阵列波导光栅应用于 CWDM 的频谱图

Fig. 6 Response of the novel reflective AWG in CWDM

## 5 结 论

对一种新型结构的阵列波导光栅<sup>[15]</sup>进行了分析, 该阵列波导光栅由非弯曲的阵列波导和两个渐变的折射率平板波导构成, 相对于传统的阵列波导光栅具有一定优势。利用傅里叶光学和光波动理论的方法建立数学模型, 讨论了两折射率平板波导的非对称性对频谱响应的影响。结果表明, 选择合理的焦距长度可以提高器件的频谱宽度与串扰特性。并提出了一种反射式结构来进一步减小 AWG 尺寸, 获得了相应的设计和计算结果。

## 参 考 文 献

- 1 G. Jeong, D. Kim, J. Choi *et al.*. Low-loss compact arrayed waveguide grating with spot-size converter fabricated by a shadow-mask etching technique [J]. *ETRI J.*, 2005, **27**(1): 89~94
- 2 S. Kamei, K. Iemura, A. Kaneko *et al.*. 1.5%-athermal arrayed-waveguide grating multi/demultiplexers with very low loss groove design [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3): 560~588

- 3 Chen Qiaohong, Huang Xuguang, Xu Wencheng. Arrayed-waveguide grating component and its applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(4): 20~24  
陈巧红, 黄旭光, 徐文成. 阵列波道光栅器件及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(4): 20~24
- 4 Tan Qinggui, Zhou Xiuli, Hu Yu. The application of arrayed waveguide grating in two dimensional optical CDMA systems[J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(3): 72~74  
谭庆贵, 周秀丽, 胡渝. 阵列波道光栅在二维光 CDMA 系统中的应用研究[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(3): 72~74
- 5 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): 656~653
- 6 Emil S. Koteles. Integrated planar waveguide demultiplexers for high-density WDM applications [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 1999, **18**(4): 211~244
- 7 Lu Ping, Nie Mingju, Liu Deming *et al.*. Fabricating waveguide material of arrayed waveguide grating using ion beam assisted deposition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 679~682  
鲁平, 聂明局, 刘德明等. 离子束辅助沉积真空镀膜技术制备阵列波道光栅波导材料[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 679~682
- 8 Li Baiyang, Jiang Xiaoqing, Tang Yanzhe *et al.*. Design of AWG demultiplexer with TIR mirrors based on SOI material[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1100~1103  
李柏阳, 江晓清, 唐衍哲等. 基于绝缘体上的硅材料的全内反射型阵列波道光栅器件的设计[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1100~1103
- 9 Zhang Haiming, Ma Chunsheng, Qin Zhengkun *et al.*. Steam-redissolution technique for reduction of polymer/Si arrayed waveguide grating loss[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 690~694  
张海明, 马春生, 秦政坤等. 减少聚合物阵列波道光栅损耗的蒸气回溶技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 690~694
- 10 Lu Si, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Design of low insertion loss arrayed waveguide grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 769~772  
陆思, 严瑛白, 金国藩等. 低插入损耗阵列波道光栅的设计[J]. *光子学报*, 2003, **32**(7): 769~772
- 11 Wan Li, Wu Yaming, Wang Yuelin. Polarization-insensitive arrayed waveguide grating multiplexer on SOI [J]. *Optoelectronic Technology*, 2003, **23**(3): 173~177  
万莉, 吴亚明, 王跃林. 基于 SOI 材料的偏振不敏感的阵列波道光栅[J]. *光电子技术*, 2003, **23**(3): 173~177
- 12 Huang Nairong, Wang Qian, He Sailing. Study of AWG based on MMI[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 413~416  
黄耐容, 王谦, 何赛灵. 基于多模干涉耦合器的阵列波道光栅设计研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(4): 413~416
- 13 B. M. A. Rahman, D. M. H. Leung, S. S. A. Obayya *et al.*. Bending loss, transition loss, mode coupling and polarization coupling in bent waveguides[C]. *SPIE*, 2008, **6996**: 69960O
- 14 Zhang Xiaokang, Liao Changjun, Liu Songhao. The relationship of the radius to the loss in bending waveguide [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 147~150  
张小康, 廖常俊, 刘颂豪. 波导弯曲半径与弯曲损耗的关系[J]. *光子学报*, 2004, **33**(2): 147~150
- 15 Ping Lu, Changlin Yan, Deming Liu *et al.*. Design and simulation of a novel arrayed-waveguide grating[J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(6): 063002
- 16 H. Takenouchi, H. Tsuda, T. Kurokawa. Analysis of optical-signal processing using an arrayed-waveguide grating [J]. *Opt. Express*, 2000, **6**(3): 124~135
- 17 P. Munoz, D. Pastor, J. Capmany. Analysis and design of arrayed waveguide gratings with MMI couplers [J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(9): 328~338
- 18 P. Munoz, D. Pastor, J. Capmany. Modeling and design of arrayed waveguide gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **20**(4): 661~674
- 19 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. New York: Mc-Graw-Hill, 1968
- 20 Qiaohong Chen, Xu Guang Huang, Wencheng Xu. A novel asymmetric arrayed waveguide grating with different lengths of input/output slabs[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **269**(26): 89~93