

文章编号: 0253-2239(2003)07-0804-5

阵列波导光栅线性系统理论分析及优化设计*

鲁 平 刘德明 曹 倩 黄德修 孙军强
(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

摘要: 运用线性系统理论分析了阵列波导光栅的模场特性, 导出器件传输的数学模型即光栅方程。提出了设计阵列波导光栅阵列波导数 M 的新方法, 该方法综合考虑了降低器件串扰以及收集发散光场的能力, 与文献[1]的方法相比简单且准确。分析了造成器件衍射损耗的原因, 提出了降低器件衍射损耗的方法。给出了 $8 \times 0.8 \text{ nm}$, 中心波长为 1550 nm 的阵列波导光栅波分复用器的设计实例, 并进行了数值模拟计算验证了文中所提方法的准确性。

关键词: 导波光学; 阵列波导; 波分复用; 光栅; 衍射
中图分类号: TN256 文献标识码: A

1 引 言

目前, 密集波分复用(DWDM)技术发展十分迅猛, 与其相关联的器件特别是阵列波导光栅(AWG)^[2,3]成为目前研究的热点。阵列波导光栅以其集成度高、体积小、成本低、可望与激光器及探测器单片集成^[4]等优势被认为是大容量、多信道的密集波分复用系统中的首选波分复用器件。

2 阵列波导光栅线性系统理论分析

阵列波导光栅器件由输入输出波导、平板波导即自由空间耦合区(FSC)以及阵列波导光栅区组成, 如图 1 所示。自由空间耦合区具有傅里叶转换透镜的作用, 通过阵列波导光栅区引入相位差, 实现不同波长信号的复用与解复用。信号从输入波导其中的一个输入, 在输入平板波导区模式场发散, 由阵列波导光栅的输入孔阑捕捉。阵列波导光栅相邻波导间的长度差 Δl 为一常量, 不同波长的输入信号引入不同的相位差。随后, 光场在输出平板波导区衍射汇聚, 不同波长的信号聚焦在像平面的不同位置, 通过合理的设计输出波导端口的位置实现信号的输出。此处设计采用对称结构, 根据互易性, 同样也能实现合波功能。文中将阵列波导光栅器件视作一个线性系统来分析与研究其传输机理。

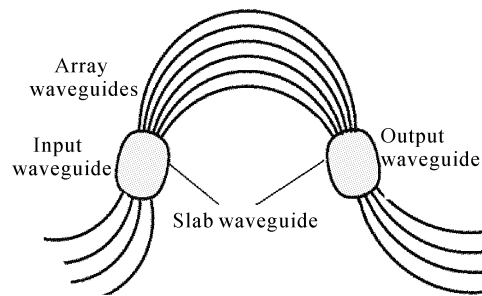


Fig. 1 Schematic diagram of an AWG

在自由空间耦合区, 输入光束垂直于波导的方向受到限制, 而宽度方向认为光场自由发散。自由空间耦合区采用罗兰圆的结构, 阵列波导排列而成的圆弧的半径 R (也称为自由空间耦合区的焦距) 为输入输出波导排列而成的圆弧半径的两倍。设输入场为 $E(x)$, 传播到自由空间耦合区另一面的光场为 $E(x')$, 根据傅里叶光学^[5] 得

$$E(x') = \int E(x) \frac{1}{j\lambda R} \exp(jkr) dx, \quad (1)$$

波数 $k = 2\pi/\lambda$, r 为自由空间耦合区输入端到输出端之间的距离。在旁轴近似下, 得 $r \approx R - xx'/R$ (在此定义沿着自由空间耦合区的曲面从下到上逆时针方向为正, 顺时针方向为负), 既而由(1) 式得

$$E(x') = \frac{\exp(jkR)}{j\lambda R} \int E(x) \exp\left(-j \frac{n_s 2\pi}{\lambda R} xx'\right) dx, \quad (2)$$

式中 n_s 为自由空间耦合区的有效折射率。

从上式可以看出自由空间耦合区的输出光场正好是输入场的傅里叶变换, 其空间频率 $f_x' = \frac{n_s x'}{\lambda R}$, 即在平板波导区是夫琅禾费衍射^[6]。则自由空间耦

* 国家自然科学基金(60177015)、湖北省自然科学基金(2000J167)重点项目资助课题。

E-mail: pluriver@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2002-06-21; 收到修改稿日期: 2002-08-15

合区可以等价如图 2 所示的结构。其耦合曲面相当于透镜的前后焦面,透镜放在正中。

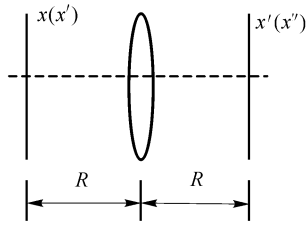


Fig. 2 The principle diagram of the slab waveguide

积分号外因子,与衍射场的相对光强无关,可以忽略不计,则(2)式可以简写为

$$E(x') = \mathcal{F}\{E(x)\} \Big|_{f_{x'}=n_s x' / (\lambda R)}. \quad (3)$$

假设信号从第 s 个输入波导输入,则自由空间耦合区输入光场的分布为

$$E(x) = E_p(x) \otimes \delta(x - sd),$$

$E_p(x)$ 为单根波导的模场分布(规定中心波导数为零,上下波导数的符号分别为负正, d 为相邻波导间的间隔)。则在输入自由空间耦合区 $E(x')$ 的另一面

光场的分布为

$$E(x') = \mathcal{F}\{E_p(x)\} \exp(j2\pi f_{x'} sd) \Big|_{f_{x'}=n_s x' / (\lambda R)}. \quad (4)$$

阵列波导区的透过率函数

$$t(x') = \left[\omega(x') \exp\left(jkn_g \Delta l \frac{x'}{d}\right) \times \sum_{i=0}^{M-1} \delta(x' - in_g d) \right] \otimes p(x'),$$

其 $\omega(x')$ 中为阵列波导区的窗口函数, $p(x') = \text{rect}\left(\frac{x'}{w_{wg}}\right)$ 为单个波导的透过率函数, w_{wg} 为单根波导的宽度, M 为阵列波导的数目, $\exp\left(jkn_g \Delta l \frac{x'}{d}\right)$ 为阵列波导所产生的相位差, n_g 为阵列波导区的有效折射率。则可得阵列波导透射光场的分布

$$E_t(x') = E(x') \left\{ \left[\omega(x') \exp\left(jkn_g \Delta l \frac{x'}{d}\right) \times \sum_{i=0}^{M-1} \delta(x' - in_g d) \right] \otimes p(x') \right\}. \quad (5)$$

在输出端自由空间耦合区场的变换与上述分析相同,仍满足傅里叶变换关系。得输出光场的分布为

$$E(x'') = \mathcal{F}\{E_t(x')\} = \left[E_p(-x) \delta\left(f_{x''} - \frac{n_s sd}{\lambda R}\right) \right] \otimes \left\{ \left[\frac{\sin(M\pi f_{x''} d)}{\sin(\pi f_{x''} d)} \otimes \mathcal{F}[\omega(x')] \right] \otimes \delta\left(f_{x''} - \frac{n_g \Delta l}{\lambda d}\right) \right\} \Big|_{f_{x''}=n_s x'' / (\lambda R)}$$

窗口函数对整个衍射光强的影响很小,可以忽略不计。则最后光场的分布为

$$E(x'') = E_p(-x) \frac{\sin\left[M\pi d \left(\frac{n_s sd}{\lambda R} + \frac{n_g \Delta l}{\lambda d} - f_{x''}\right)\right]}{\sin\left[\pi d \left(\frac{n_s sd}{\lambda R} + \frac{n_g \Delta l}{\lambda d} - f_{x''}\right)\right]} \text{sinc}\left[w_{wg} \left(\frac{n_s sd}{\lambda R} - f_{x''}\right)\right] \Big|_{f_{x''}=n_s x'' / (\lambda R)}, \quad (6)$$

式中 $\text{sinc}\left[w_{wg} \left(\frac{n_s sd}{\lambda R} - f_{x''}\right)\right]$ 为单缝衍射的影响因素。

将输入光场场强归一化,光强度分布与光场分布的关系为

$$I \propto |E(x'')|^2 = \frac{\sin^2\left[M\pi d \left(\frac{n_s sd}{\lambda R} + \frac{n_g \Delta l}{\lambda d} - f_{x''}\right)\right]}{\sin^2\left[\pi d \left(\frac{n_s sd}{\lambda R} + \frac{n_g \Delta l}{\lambda d} - f_{x''}\right)\right]} \text{sinc}^2\left[w_{wg} \left(\frac{n_s sd}{\lambda R} - f_{x''}\right)\right], \quad (7)$$

则可得衍射方程

$$dn_s \sin \theta + n_g \Delta l - dn_s \sin \theta' = m\lambda, \quad (8)$$

其中 $\sin \theta' = \frac{x''}{R}$, $\sin \theta = \frac{sd}{R} m$ 为波导的衍射级。

设计中使 $\Delta l = m\lambda_0 / n_g$ (λ_0 为中心波长)。由衍射方程可知,对于中心波长 λ_0 ,其输入角与衍射角相同,即中心波长的信号输出端聚焦的位置与输入端相同。而对于其它波长的信号,由于阵列波导区域引入的相位差随波长的变化而变化,而聚焦在不同的地方,实现分离。

3 阵列波导光栅的结构优化设计

3.1 确定阵列波导光栅波导数目的新方法

阵列波导数目 M 的确定是阵列波导光栅设计中的一个关键因素,文献[1]中 M 的确定方法是通过分析阵列波导的孔径半角与高斯光束的远场发散半角的比值与串扰之间的关系来进行确定的,这种方法精确度不高,因为很难精确确定串扰与它们比值的准确对应关系。通过研究我们确定了一种新的计算 M 的方法。为了分析方便,我们假设信号是从

中心波导输入,由(8)式得到如下结果。

当波长为 λ 的光信号在输出平面为主极大时满足

$$dn_s \sin \theta' - n_g \Delta l = m\lambda, \quad (9)$$

其在输出平面的极小值应该满足

$$\begin{aligned} dn_s \sin \theta' - n_g \Delta l &= (m + m'/M)\lambda, \\ m' &= 1, 2, 3, \dots, M-1 \end{aligned} \quad (10)$$

若其某一极小值与极大值聚焦在输出平面的位置差正好为相邻波导间的间隔 d 时,则该波长的光信号对邻近波导的串扰为零。两式相减得

$$(m'/M)\lambda = n_s d^2 / R. \quad (11)$$

另外阵列波导的数目应该能够保证输入平板波导区的发散光场能够被阵列波导完全收集,应该使阵列波导光栅区域大于平板波导中光场的发散区域。

阵列波导单缝衍射输出的光场近似为高斯分布,其远场发散半角 $\theta_0 = \lambda / \pi n_s \omega_0$, ω_0 为波导光场的模场半径,远场发散区域为 $2\lambda R / (\pi n_s \omega_0)$,

$\left[\omega_0 = \omega_c \sqrt{\frac{2}{\pi}}, \omega_c = w_{wg} \left(0.5 + \frac{1}{V-0.6} \right)^{[7]} \right]$ 。则要求

$$M \geq \frac{2\lambda R}{\pi n_s \omega_0 d} + 1, \quad (12)$$

由(11)式、(12)式,得

$$m' > 2d / (\pi \omega_0). \quad (13)$$

阵列波导数目不能太多,否则阵列波导光栅区的结构不好设计,而且增加了器件的加工难度。根据这个原则,选取 m' 值大于(13)式右边的最小整数,再由(11)式确定阵列波导数目 M 。可见这种确定阵列波导数目 M 的方法简单、准确,而且综合考虑了器件的串扰以及收集发散光场的能力。

3.2 阵列波导光栅衍射损耗分析

在阵列波导光栅中造成器件的插损主要为:1) 光纤与波导的耦合损耗。它可通过选取与光纤结构相似的波导材料降低损耗。2) 器件的弯曲波导所造成的辐射损耗。可通过增大波导的弯曲半径来降低。3) 器件的吸收或光在器件传输过程中的散射损耗。一般很小,可忽略。4) 信号光发生衍射时,其他衍射级次的主极大造成的鬼影无法被输出波导接受所引起的衍射损耗,此为造成器件损耗的主要原因。同样为了分析方便,我们假设信号是从中心波导输入,信号波长为器件的中心波长 λ_0 。由(9)式可以得出,不同衍射级将会在输出平板波导不同方向聚焦。分别

为 $\theta' = 0, \pm \lambda_0 / (n_s d), \pm 2\lambda_0 / (n_s d), \dots$ 。 $\theta' = 0$ 处为主光束,其它为不希望的重影,它们将会影响主光束的光功率,引起损耗。因为相邻 $m \pm 1$ 衍射级次的重影所引起的衍射损耗最大,此次分析计算只考虑他们。根据(7)式以及前面条件可得,单缝衍射因子为 $\text{sinc}^2[w_{wg} f_x]$,继而得相邻衍射级次的归一化光强为

$$I_{\text{neighbor}} = \frac{\sin^2[\pi w_{wg} (1/d)]}{[\pi w_{wg} (1/d)]^2}. \quad (14)$$

可见,若将阵列波导区与输出平板波导相连处的波导宽度值 w_{wg} 设计为等于文献[8]分析计算的相邻波导间隔 d ,经过一定的长度之后,再过渡到波导宽度值,理论上将可使相邻衍射级次的归一化光强为零。即意味着阵列波导输出部分的宽度越接近相邻波导间隔,其衍射损耗越小。所以在设计时将阵列波导区的输出部分做成如上所述的锥形,同时为了充分地收集发散光场,将阵列波导的输入孔阑处的波导也设计为锥形。在阵列波导光栅的输入平板波导区光场的分析与输出平板波导一样,则同样将输入波导与输入平板波导的相联处也设计为锥形。另外,为了提高输出通带的平坦度,将输出平板波导与输出波导的相连处也设计为锥形。

同时为了消除偏振模色散对器件性能的影响,可将器件波导设计为正方形^[9]。

4 阵列波导光栅的设计与数值模拟分析

以上分析了影响器件工作的几个基本因素,在进行器件结构设计时要综合考虑以上因素。整个阵列波导光栅器件的设计是基于衍射方程进行的,其具体的设计方法可参见文献[1]。在设计中波导材料采用硅基二氧化硅-二氧化锗波导。波导材料与光纤类似,以便与光纤耦合,减小模场失配,减少耦合损耗^[10]。波导与包层的折射率分别为1.468与1.462。在设计中采用对称结构,为了减少相邻输出波导间的光场耦合,输出波导间的间隔应该足够大,但为了提高器件的色分辨能力,尺寸又不能太大。设计时要求器件的串扰为-35 dB,选取波导宽度 w_{wg} 为6 μm ,由文献[8]可得此处 $d = 17.4 \mu\text{m}$ 。器件中心波长为1550 nm,信道间隔 $\Delta\lambda = 0.8 \text{ nm}$ 。

通过分析计算,可得器件的结构参量如表1所示。

Table 1 The designing parameters of arrayed-waveguide grating

Effective index of slab waveguide n_s	1.467
Effective index of array waveguides n_g	1.465
Wavelength spacing $\Delta\lambda$ /nm	0.8
Pitch of adjacent waveguides d / μm	17.4
Width of waveguide w_{wg} / μm	6
Mode field radius ω_0 / μm	4
Far field half angle θ /rad	0.0755
Diffraction order m	164
Number of channels n_{ch}	8
Free spectral range F_{FSR} /nm	9.45
Length increment of array waveguide Δl / μm	173.511
Focal length of slab waveguide R / μm	3364.7

根据(13)式得 $m' > 2.77$, 在此选择 m' 为 3, 既而由(11)式得阵列波导数 M 为 35。通过计算两相邻极小值的间隔为 $5.84 \mu\text{m}$, 第三个极小值对应的位置相距主极大的距离为 $17.52 \mu\text{m}$, 该值与相邻波导间隔 $17.4 \mu\text{m}$ 相差无几, 则说明本文所提出的确定阵列波导数 M 具有很高的准确性。当波导数比 35 或大或小时, 都会使输出光场的次级大耦合到其他的输出波导中, 而造成较大的串扰。而采用此方法设计的阵列波导光栅, 可以大大降低相邻波导间的串扰。为了验证文中所提确定阵列波导数目 M 以及降低衍射损耗方法的准确性, 采用光束传播法对其进行数值模拟, 只考虑衍射所造成的损耗, 忽略其他损耗。以中心波长为 1550 nm 的信号光输入, 分别进行了采用了降低衍射损耗方法与没有采用降低衍射损耗方法的数值模拟, 得到其输出光场分布如图 3 与图 4 所示。

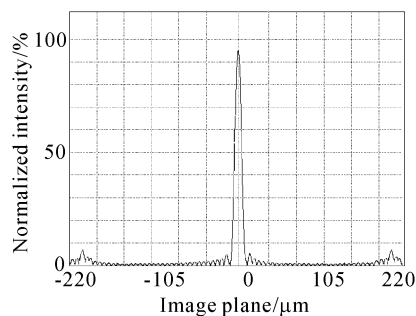


Fig. 3 The output optical field diagram adopting the method to reduce the diffraction loss

从图 3 和图 4 可以看出输出衍射场的两相邻极小值间距离为 $5.83 \mu\text{m}$, 其第三个极小值对应的位置相对零点距离为 $17.5 \mu\text{m}$, 这与两波导间隔 $17.4 \mu\text{m}$ 极为接近, 可以保证该信号波长由于衍射而对相邻信道产生的串扰很小, 接近为零。其衍射

级为 $m \pm 1$ 的主极大的位置距离中心参考点为 $204.3 \mu\text{m}$, 大于器件的输出波导的接收区域 $S_{\text{max}} = 121.8 \mu\text{m}$ 。可见, 这些衍射级产生的衍射光造成了器件的损耗。若不采用文中所介绍降低衍射损耗的方法, 从图 4 可以看出其相邻衍射级所造成的归一化光强约为总光强的 28%, 而主光束的光强只有总光强的 43% 左右, 可见其造成的衍射损耗很大, 大大削弱了主通道的光强。而通过改善波导的结构后, 大大降低了相邻衍射级所造成的归一化光强, 如图 3 所示, 其光强只有主光束的 0.7% 左右, 则很好地降低了器件的衍射损耗, 提高了器件的衍射效率。

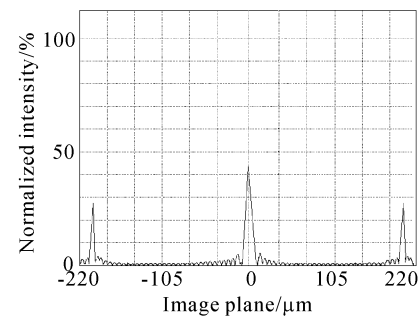


Fig. 4 The output optical field diagram without adopting the method to reduce the diffraction loss

综上所述, 文中所提到的确定阵列波导数目 M 以及降低衍射损耗的方法准确、简单, 完全可行。根据以上参量设计的 $8 \times 0.8 \text{ nm}$ 的阵列波导光栅器件的串扰优于 -35 dB , 插入损耗小, 结构紧凑, 几何尺寸可做到 $1 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 。

参 考 文 献

- 1 Smit M K, Dam C V. PHASAR-based WDM-devices: principles, design and applications. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 1996, **2**(2): 236~250
- 2 Chen Dehua, Wang Hui, Yang Xianglin. Impact of crosstalk on arrayed-waveguide grating multiplexer calculated by saddlepoint approximation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(10): 1310~1314 (in Chinese)
- 3 Li Baiyang, Jiang Xiaoqing, Tang Yanzhe *et al.*. Design of a AWG demultiplexer with TIR mirrors based on SOI material. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(9): 1100~1103 (in Chinese)
- 4 Zirngibl M, Joyner C H, Dragone C *et al.*. Polarization independent 8×8 waveguide grating multiplexer on InP. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(2): 201~202
- 5 Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. San Francisco: McGraw-Hill, Inc., 1968
- 6 Munoz P, Pastor D, Capmany J. Modeling and design of arrayed waveguide gratings. *Lightwave Technol.*, 2002, **20**(4): 661~674

- 7 Unger H G. *Planar Optical Waveguides and Fibers*. Oxford: Clarendon Press, 1977
- 8 Lei Hongbin, Ou Haiyan, Yang qinqing *et al.*. Crosstalk simulation of output waveguides structure in arrayed waveguide grating demultiplexer. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1999, **28**(7):630~633
- 9 Soole J B D, Amersfoort M R, Leblanc H P *et al.*. Polarization-independent InP arrayed waveguide filter using square cross-section waveguides. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(4):323~324
- 10 Marz R. *Integrated Optics: Design and Modeling*. Norwood, MA: Artech House, 1994

Theoretical Analysis of Arrayed-Waveguide Grating As a Linear System and Its Optimal Structure Design

Lu Ping Liu Deming Cao Qian Huang Dexiu Sun Junqiang

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

(Received 21 June 2002; revised 15 August 2002)

Abstract: The characteristic of arrayed-waveguide gratings is analyzed with the linear systems theory and the optical grating equation is deduced. A new method for calculating the number of arrayed-waveguide is proposed in consideration of reducing the crosstalk and gathering the radiating beam of light. This method is accurate and simple compared with the method given in Ref. [1]. The reason of causing the diffraction loss is analyzed, and the method to reduce the diffraction loss is introduced. As an example, 8×0.8 nm AWG multiplexer is designed with a center wavelength 1550 nm. The accuracy of this methods is proved by numeric model calculation.

Key words: guiding wave optics; arrayed-waveguide; wavelength division multiplexing; grating; diffraction