

# 聚合物阵列波导光栅波分复用器传输特性分析

郭文滨 马春生 陈维友 张大明 陈开鑫 赵 禹 崔占臣 刘式墉

(吉林大学电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点实验室, 长春 130023)

**摘要:** 针对一种中心波长为  $1.55\mu\text{m}$ 、波长间隔为  $1.6\text{nm}$  的聚合物阵列波导光栅波分复用器, 对其功率分布、分波波谱、自由光谱区(FSR)、衍射效率、串扰等进行了详细的分析. 并对波导芯尺寸、相邻阵列波导间距、衍射级数、阵列波导数等参量进行了优化, 得到了器件实际设计所需要的相应的参数值, 从而达到优化器件设计的目的.

**关键词:** 阵列波导光栅 (AWG); 波分复用器; 衍射效率; 串扰

**EEACC:** 4130; 4140

**中图分类号:** TN814.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2002)06-0619-05

## 1 前言

波分复用技术(WDM)是实现光纤大容量传输的有效途径之一, 阵列波导光栅(AWG)波分复用器是光通信波分复用系统中的关键器件<sup>[1~4]</sup>. AWG波分复用器具有复用、解复用、上下路由、光交叉互连等功能. 同时, 它还具有其它波分复用器件不具备的优点, 如容易集成、波长间隔小、信号通道多、串扰低等. 国内外已有很多关于 AWG 波分复用器方面研究的报道<sup>[5~7]</sup>.

最近, 聚合物 AWG 以其制造容易、传输损耗低、模式双折射小<sup>[8,9]</sup>、温度依赖性好等优点引起了极大的关注. 虽然国外有很多这方面的报道<sup>[10~14]</sup>, 但国内的研究还处于起步阶段.

本文分析了一种聚合物 AWG 波分复用器的传输特性, 对器件的有关参数进行了优化, 找到了符合实际条件要求的器件尺寸, 达到优化器件结构设计的目的.

## 2 阵列波导光栅波分复用器/解复用器的基本结构

AWG 波分复用器的基本结构由输入/输出通道、AWG 和连接它们的平板波导组成, 如图 1 所

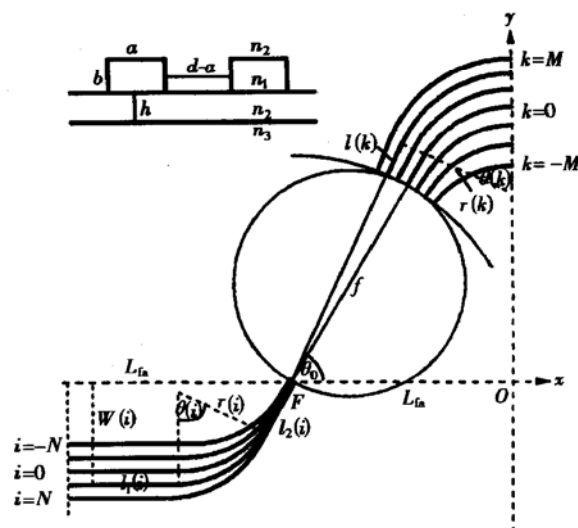


图 1 阵列波导光栅复用器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an AWG multiplexer

示. 由于器件是对称结构, 这里只给出了结构的一半. 一束含有不同波长的复光通过输入波导, 进入平板波导中的自由传播区. 在输入波导中, 光波受到横向限制, 而进入自由传播区以后, 光束横向发散, 不再受到限制, 在 AWG 的接收端, 发散光波与阵列波导耦合进入波导阵列. 相邻的阵列波导具有相同的长度差, 经相邻的阵列波导后, 产生了相同相位差, AWG 的出射光在输出平板波导产生衍射, 于是不同波长的光被输出平板波导聚焦到不同的输出通道

位置,完成了解分波复用功能.

### 3 传输理论

为了便于描述,我们首先定义器件中的参数名称, $a$ 为波导芯层的宽度, $b$ 为波导芯层的厚度, $d$ 为相邻阵列波导间距. $n_1, n_2$ 分别为波导芯层和包层的折射率. $n_s$ 和 $n_c$ 分别为平板波导的 $\text{TM}_0$ 模和矩形波导的 $E_{00}$ 模的有效折射率, $n_g$ 是群折射率, $m$ 是衍射级数, $\lambda$ 和 $\lambda_0$ 分别为自由空间的波长和中心波长. $\Delta\lambda$ 是波长间隔, $\theta_{\text{in}}$ 和 $\theta_{\text{out}}$ 分别为输入角和输出角. $F$ 为平板波导焦距,FSR为自由光谱区, $\Delta L$ 为相邻阵列波导长度差, $\Delta\theta$ 是相邻波导角间隔.在AWG波分复用器中有以下的基本关系式<sup>[15]</sup>:

$$f = \frac{n_s d^2}{m \Delta\lambda} \times \frac{n_c}{n_g} \quad (1)$$

$$\text{FSR} = \frac{\lambda_0}{m} \times \frac{n_c}{n_g} \quad (2)$$

$$\Delta L = \frac{m \lambda_0}{n_c} \quad (3)$$

$$\Delta\theta = 2 \arcsin \left[ \frac{d}{2f} \right] \quad (4)$$

$$E(\theta_{\text{out}}) = E_0(\theta_{\text{out}}) \frac{1 + 2 \sum_{k=1}^M E_0(k\Delta\theta) \cos \left[ k \frac{2\pi}{\lambda} [n_s d \sin\theta_{\text{in}} + n_c \Delta L + n_s d \sin\theta_{\text{out}}] \right]}{1 + 2 \sum_{k=1}^M E_0(k\Delta\theta)} \quad (9)$$

$$P(\theta_{\text{out}}) = E^2(\theta_{\text{out}}) \quad (10)$$

这里的 $E_0(\theta_{\text{out}})$ 是在(8)式中令 $\theta = \theta_{\text{out}}$ 而得到的.

### 3.2 传输光谱

用传输函数 $T(\lambda)$ 来描述AWG波分复用器的传输光谱,其定义为:

$$T(\lambda) = 10 \lg [P(\lambda)] \quad (11)$$

式中的 $P(\lambda)$ 由(10)式给出,它是波长 $\lambda$ 的函数.

### 3.3 衍射效率

在输入平板波导中,当光波到达输入平板波导和阵列波导的界面时,只有一部分光能进入阵列波导中.输入平板波导的衍射效率可表示为:

$$\eta_{\text{in}} = \frac{\sum_{k=-M}^M \int_{k\Delta\theta - \delta\theta/2}^{k\Delta\theta + \delta\theta/2} |E_i(\theta)|^2 d\theta}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} |E_i(\theta)|^2 d\theta} = \frac{\sum_{k=-M}^M \int_{k\Delta\theta - \delta\theta/2}^{k\Delta\theta + \delta\theta/2} E_0^2(\theta) d\theta}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} E_0^2(\theta) d\theta} \quad (12)$$

$$n_g = n_c - \lambda \frac{dn_c}{d\lambda} \quad (5)$$

### 3.1 电场和功率分布

第 $i$ 个输入通道在输入平板波导中的相对电场和功率分布可以表示为:

$$E_i(\theta) = E_0(\theta) \exp[jk_x i d \sin\theta] \quad (6)$$

$$P_i(\theta) = |E_i(\theta)|^2 = E_0^2(\theta) = P_0(\theta) \quad (7)$$

式中

$$E_0\theta = k_x^2 q_x \cos\theta \times \frac{q_x \cos \left[ \frac{1}{2} k_s a \sin\theta \right] - k_s \sin\theta \sin \left[ \frac{1}{2} k_s a \sin\theta \right]}{[k_x^2 - k_s^2 \sin^2\theta][q_x^2 + k_s^2 \sin^2\theta]} \quad (8)$$

这里 $j = \sqrt{-1}$ 是虚数单位; $\theta$ 为光在输入平板波导的衍射角; $E_0(\theta)$ 和 $P_0(\theta)$ 分别为中心波导的相对电场和功率分布; $k_s = (2\pi/\lambda) n_s$ 是平板波导的模传播常数; $k_x$ 为矩形波导的模横向传播常数; $q_x$ 为矩形波导的横向衰减常数,二者可以从矩形波导的特征方程求出<sup>[16]</sup>.阵列波导的输出光在输出平板波导中产生衍射,总的相对功率分布为:

式中 $\delta\theta = 2 \arcsin(a/2f) \approx a/f$ , $E_i(\theta)$ 和 $E_0(\theta)$ 分别由(6)式和(8)式给出.

在输出平板波导中,当光波到达输出平板波导和输出通道的界面时,只有主衍射峰携带的那部分能量可以进入输出通道,次衍射峰(称为魔鬼峰)携带的光能被浪费掉了.当不同波长的光从第 $i$ 个输入通道输入时,只有波长为 $\lambda = \lambda_0 + (i+j)\Delta\lambda$ 的光波( $l = i+j$ )能从第 $j$ 个输出通道输出.因此,在输出平板波导中波长为 $\lambda$ 的光的衍射效率可以表示为:

$$\eta_{\text{out}}(\lambda) = \frac{E^2(l\Delta\theta)}{\sum_{v=-m}^m E^2(l\Delta\theta + v\Delta\theta_m)} = \frac{E_0^2(l\Delta\theta)}{\sum_{v=-m}^m E_0^2(l\Delta\theta + v\Delta\theta_m)} \quad (13)$$

式中 $m = \text{int}(\pi/2\Delta\theta_m)$ , $\Delta\theta_m = \lambda_0/n_s d$ , $E(l\Delta\theta)$ 和 $E_0(l\Delta\theta + v\Delta\theta_m)$ 可分别在(6)式和(7)式中令 $\theta = l\Delta\theta$ 和 $\theta = l\Delta\theta + v\Delta\theta_m$ 而得到.

### 3.4 串扰特性

当不同波长的光从第  $i$  个输入通道输入时, 从第  $j$  个输出通道输出的光主要是波长为  $\lambda = \lambda_0 + (i + j)\Delta\lambda$  的光. 而  $j' \neq j$  的输出通道中相同波长的光通过第  $j$  个通道的光能很弱. 由其它  $2N$  个输出通道在第  $j$  个通道中波长为  $\lambda$  的波的串扰可以表示为:

$$L_{CT}^j(\lambda) = 10\lg \left[ \frac{\sum_{i' \neq j, j' = -N}^N E^2(\lambda, i\Delta\theta, j'\Delta\theta)}{E^2(\lambda, i\Delta\theta, j\Delta\theta)} \right] \quad (14)$$

式中  $E(\lambda, i\Delta\theta, j'\Delta\theta)$  是在(9)式中令  $\theta_m = i\Delta\theta, \theta_{out} = j'\Delta\theta$  而得到的.

## 4 结果与讨论

在 AWG 波分复用器的设计中, 我们选择了输出通道数为  $2N + 1 = 9$ , 中心波长为  $\lambda_0 = 1.550918\mu\text{m}$ , 波长间隔为  $\Delta\lambda = 1.6\text{nm}$ . 为了保证器件中基模传输中的单模特性, 我们选择芯厚度为  $4\mu\text{m}$ , 芯宽度为  $6\mu\text{m}$ , 芯区材料是 epoxypropyl methylacrylate-co-methylmethacrylate polymer 和 bisphenyl A epoxy 的混合物, 其折射率为  $n_1 = 1.495$ , 包层材料是 epoxypropyl methylacry-co-methyl methacrylate polymer, 其折射率为  $n_2 = 1.483$ , 二者的相对折射率差为  $\Delta n = (n_1 - n_2)/n_1 = 0.8\%$ . 以上数据由 Woolam NE Lincoln, USA 提供.

图 2 给出了光在输入和输出平板波导时的功率分布  $P(\theta)$ . 图 2(b) 给出了光在输出平板波导的功率分布  $P(\theta_{out})$ , 取阵列波导数  $2M + 1 = 91$ . 可以看出, 图 2(b) 中光在输出平板波导中的包络线即为图 2(a) 中光在输入平板波导中的功率分布曲线. 由于阵列波导数较大,  $2M + 1 = 91$ , 使得图 2(b) 中的衍射峰变得很窄很亮, 背景变得很暗, 因而可以获得较大的衍射效率, 较小的衍射损耗.

图 3 给出了阵列波导数对输出光的旁瓣压制. 可以看出阵列波导数越大, 对旁瓣的压制越好, 当  $2M + 1 = 91$  时, 已把旁瓣压到  $-64\text{dB}$  以下. 图 4 给出了不同波长的光从中心输入通道 ( $i = 0$ ) 输入, 再从不同通道输出时的分波光谱. 可以看出, 波长间隔  $\Delta\lambda = 1.6\text{nm}$ , 这和最初的设计值是完全相同的. 图 5 反映的是器件的自由光谱区特性, 可以确定  $\text{FSR} = 14.542\text{nm}$ , 这和用公式(2)计算的结果相符.

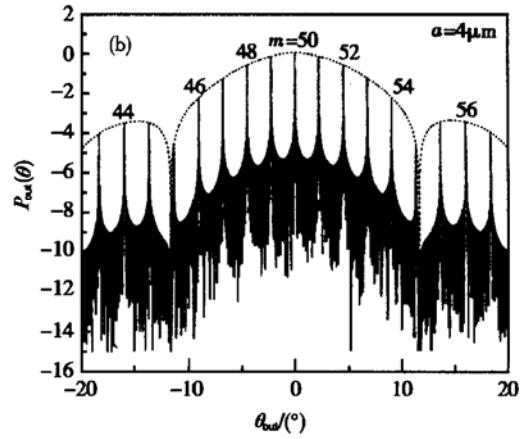
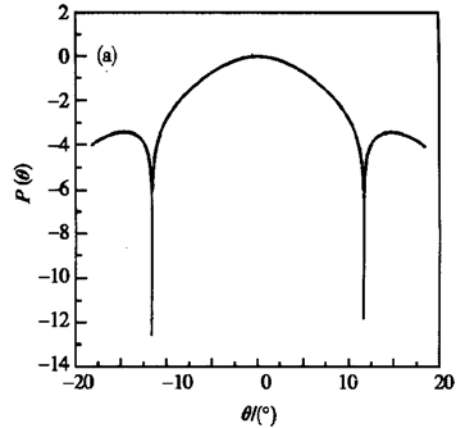


图 2 (a) 输入平板波导功率分布与衍射角关系; (b) 输出平板波导功率分布与衍射角关系

Fig. 2 (a) Relation between diffraction angle and power profile in input slab waveguide; (b) Relation between diffraction angle and power profile in output slab waveguide

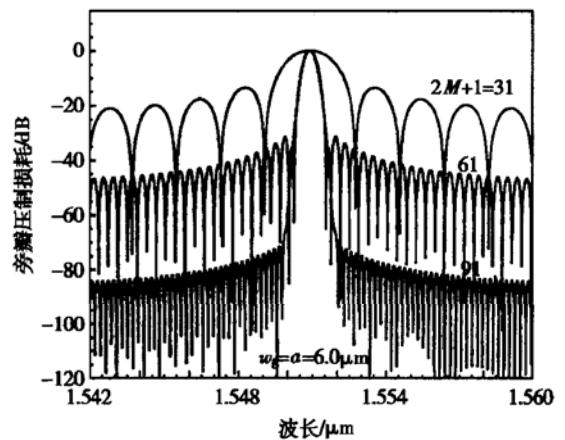


图 3 阵列波导数对输出光的旁瓣影响

Fig. 3 Effect of the number of arrayed waveguide on output light power

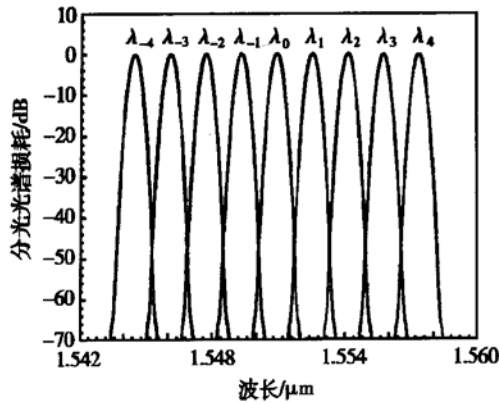


图 4 分光光谱

Fig. 4 Multiplexed wavelengths in the transmission spectra

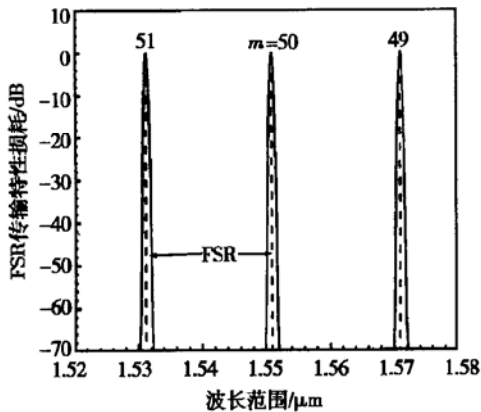


图 5 自由光谱区的传输损耗

Fig. 5 Transmission consumption in FSR

由于芯宽度通常远小于相邻波导间距  $d$ , 输入平板波导的衍射效率  $\eta_m$  一般较小. 因此, 可以用一个锥形端口来增宽阵列波导的输入端口以增大衍射效率. 图 6 给出了阵列波导数  $2M+1$  和阵列波导输入锥形端口宽度  $w_g$  对输入平板波导衍射效率  $\eta_m$  的影响. 由图可以看出,  $w_g$  和  $2M+1$  的值越大, 衍射效率  $\eta_m$  就越大. 例如, 当  $2M+1=91$ , 且波导端口没有展宽时, 即  $w_g = a = 6\mu\text{m}$  时, 衍射效率  $\eta_m$  为 38.5%. 如果波导端口展宽到与相邻波导间距  $d$  相等时, 即  $w_g = d$ , 输入平板波导中几乎所有的衍射能量都被阵列波导所收集. 在这种情况下, 衍射效率  $\eta_m$  达到 99.8%.

图 7 显示了衍射级数  $m$  和相邻波导间距  $d$  对中心通道(中心波长  $\lambda_0$ ) 串扰  $L_{\text{CT}}^0(\lambda_0)$  的影响. 这里, 光是从中心输入通道输入和从  $2N+1$  个输出通道输出的. 图中给出了相关的参数值. 可以看出, 衍射

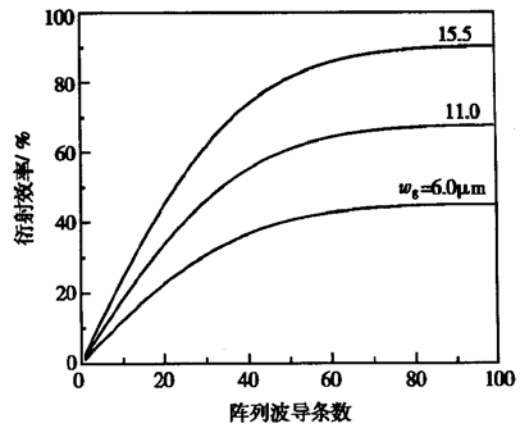


图 6 输入平板波导衍射效率与阵列波导数关系

Fig. 6 Relation between the number of arrayed waveguide and the diffraction efficiency in the input waveguide

级数  $m$  越大, 串扰  $L_{\text{CT}}^0(\lambda)$  就越小. 衍射级数  $m$  不能太小, 但也不能太大. 这是因为, 如果  $m$  太小, 串扰就会很大, 如果  $m$  太大, 输入/输出通道的数量就会减少. 还可以看出, 随着相邻波导间距的变化, 串扰存在一个极小值. 当芯区厚度  $a = 6\mu\text{m}$ , 相邻波导间距  $d = 15.5\mu\text{m}$ , 衍射级数  $m = 50$  时, 其它通道对中心通道的串扰  $L_{\text{CT}}^0(\lambda_0)$  降到了  $-50\text{dB}$  以下.

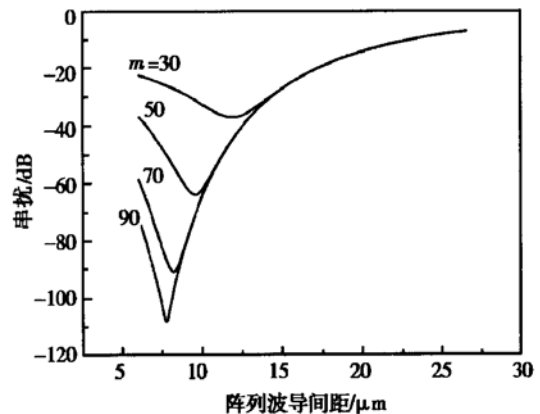


图 7 波导间距与串扰关系

Fig. 7 Relation between the distance of adjacent arrayed waveguides and crosstalk

## 5 结论

通过以上对聚合物 AWG 波分复用器传输特性的分析, 为了保证器件的单模传输和较小的串扰, 我们选择波导芯的厚度为  $4\mu\text{m}$ , 芯的宽为  $6\mu\text{m}$ , 相邻波导间距为  $15.5\mu\text{m}$ , 可以得到如下结论:

阵列波导数越大时, 衍射光输出功率分布的衍射峰就会越亮越窄, 背景光就越暗, 器件衍射效率就越高, 衍射损耗就越小.

将阵列波导的输入端口做成锥形, 能有效地提高衍射效率. 例如, 当阵列波导端口宽度等于相邻阵列波导间距时, 输入平板波导中的光能几乎全部进入了阵列波导中. 这种情况下, 输入平板波导中的衍射效率几乎可以达到 100%.

随着相邻波导间距的变化, 串扰会出现一个最小值. 所以, 我们可以适当选择相邻波导间距的值, 使器件的串扰最小. 例如, 当芯区厚度为  $4\mu\text{m}$ , 芯区宽度为  $6\mu\text{m}$ , 衍射级数为 50, 阵列波导数为 91 时, 可选择相邻波导间距为  $15.5\mu\text{m}$ . 此时, 器件的衍射效率将达到 57%, 每个输出通道间的串扰将降为 -50dB 以下.

#### 参考文献

- [ 1 ] Smit M K. Electron Lett, 1998, 24: 385
- [ 2 ] Takahashi H, Suzuki S, Katoh K, et al. Electron Lett, 1990, 26: 87
- [ 3 ] Takahashi H, Hibino Y, Nishi I. Opt Lett, 1992, 17: 499
- [ 4 ] Suzuki S, Inoue Y, Ohmori Y. Electron Lett, 1994, 30: 642
- [ 5 ] Ou Haiyan, Lei Hongbing, Yang Qinqing, et al. Arrayed-waveguide layout for AWG design. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21: 115
- [ 6 ] Lei Hongbing, Ou Haiyan, Yang Qinqing, et al. Analysis and design of array aperture for phased-array waveguide grating multidemultiplexer. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21: 359 [ 雷红兵, 欧海燕, 杨沁清. 阵列波导光栅复用/解复用器光栅孔径对器件性能影响的值分析. 半导体学报, 2000, 21: 359 ]
- [ 7 ] Ou Haiyan, Lei Hongbing, Yang Qinqing, et al. Simple method for design  $1 \times 8$  arrayed-waveguide grating multidemultiplexers. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21: 798 [ 欧海燕, 雷红兵, 杨沁清, 等.  $1 \times 8$  阵列波导光栅型波分复用/解复用器设计的一种简单方法. 半导体学报, 2000, 21: 798 ]
- [ 8 ] Takahashi H, Hibino Y, Nishi I. Opt Lett, 1992, 17B: 499
- [ 9 ] Takahashi H, Hibino Y, Ohmori Y, et al. IEEE Photonic Technol Lett, 1993, 5: 707
- [ 10 ] Casey H C, Panish M B. Heterostructure Lasers, Part A. New York: Academic Press, 1978: 76
- [ 11 ] Diemeer M B J, Spiekman L H, Ramsamoedj R, et al. Electron Lett, 1996, 32: 1132
- [ 12 ] Dragone C. J Lightwave Technol, 1989, 7: 479
- [ 13 ] Dragone C, Edwards C A, Kistler R C. IEEE Photonics Technol Lett, 1991, 3: 896
- [ 14 ] Hida Y, Inoue Y, Imamura S. Electron Lett, 1994, 30: 959
- [ 15 ] Zirngibl M, Joyner C H, Stulz L W, et al. Electron Lett, 1993, 29: 201
- [ 16 ] Marcatili E A J. Bell System Tech J, 1969, 48: 2071

## Analysis of Transmission Characteristics of Polymer Arrayed Waveguide Grating Multiplexer

Guo Wenbin, Ma Chunsheng, Chen Weiyong, Zhang Daming, Chen Kaixin,  
Zhao Yu, Cui Zhanchen and Liu Shiyong

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, School of Electronic Science and Engineering,  
Jilin University, Changchun 130023, China)

**Abstract:** A polymer arrayed waveguide grating multiplexer with the central wavelength of  $1.55\mu\text{m}$  and the wavelength spacing  $1.6\text{nm}$  is studied and transmission characteristics are analyzed. The characteristics include the power profile, transmission spectra, FSR, diffraction efficiency and crosstalk. Some parameters, such as the core width, pitch of adjacent waveguides, diffraction order, number of arrayed waveguides, and propagating wavelength are optimized for the purpose of actual design.

**Key words:** arrayed waveguide grating; multiplexer; diffraction efficiency; crosstalk

**EEACC:** 4130; 4140

**Article ID:** 0253-4177(2002)06-0619-05