

文章编号: 0258-7025(2004)03-0313-05

一种降低阵列波导光栅相邻信道串扰的方法

朱大庆

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 阵列波导光栅(AWG)作为波长滤波器在光通信领域具有很大的应用前景。串扰是影响阵列波导光栅应用的重要因素之一。为了降低阵列波导光栅相邻信道的串扰,本文提出并研究了一种降低阵列波导光栅的新方法。该方法利用阵列波导光栅的衍射特点性,通过调节阵列波导光栅的自由光谱范围(FSR)、罗兰圆焦距和阵列波导数目,使得各信道信号的输出极小值处于其它信道输出波导中心,无次极大处于其它波导中,从而降低了阵列波导光栅的串扰,特别是相邻信道之间的串扰。通过光束传播方法(BPM)的模拟了具有不同FSR的 1×16 阵列波导光栅,结果显示,该方法能将相邻信道之间的串扰降低约5.7 dB。

关键词 光电子学;阵列波导光栅;串扰;集成光学

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

A Way of Adjacent Crosstalk Reduction for AWGs

ZHU Da-qing

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of
Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The arrayed waveguide grating (AWG) has greatly prospective in optical communication as a wavelength filter. Crosstalk is one of the most important factors which block the wide use of AWGs. In order to reduce the crosstalk of an AWG, a new method was proposed and studied in this paper. In this method, the output minimum of a channel is located at the center of the waveguides of other channels and there is no sidelobes of the channel in the waveguides of other channels in the mean time by adjusting the free spectrum range (FSR) of AWG, foca length of Rowland circle and the number of the waveguide array. Thus the crosstalk of an AWG, pecially the adjacent crosstalk can be reduced greatly. Numerical approaching of 1×16 AWGs with different FSR by beam propagation method (BPM) shows the adjacent crosstalk can be reduced about 5.7 dB by this method.

Key words optoelectronics; AWG; crosstalk; integrated optics

1 引言

在密集波分复用(DWDM)中,波长滤波器是最重要的无源器件。阵列波导光栅(AWG)以其低插入损耗、高稳定性、易于大规模制作、低制作成本和易于与其他器件集成等优点,成为波长滤波器的最有竞争力的器件^[1~4]。

串扰是阵列波导光栅最重要的指标之一。引起阵列波导光栅串扰的因素很多^[5,6],在实际制作中,

串扰主要是由制作误差决定的^[5]。虽然如此,只有在合适的设计情况下才能够得到比较低的串扰。在设计中,通常采用增加波导的V值、阵列波导孔径和输出波导间距的方法来降低设计的串扰,但这些都都有其局限性^[7]。

本文提出并研究了一种新的方法,利用阵列波导光栅的衍射特性,通过调节其自由光谱范围(FSR)和阵列波导数目来降低相邻信道之间的串扰。

收稿日期:2002-10-09;收到修改稿日期:2003-01-27

基金项目:华中科技大学2001年校基金资助项目。

作者简介:朱大庆(1966—),男,华中科技大学激光技术国家重点实验室博士,现主要从事集成光子器件的研究。E-mail: zhenex@wz.163.com.cn

2 阵列波导光栅的输出特性

阵列波导光栅的结构示意图见图 1。当一束含有不同波长的光通过输入波导进入左边的罗兰圆，设此处为面 0，横向坐标定为 y ，场强分布为 E_0 ；左边罗兰圆与波导阵列的交界处定义两个面：面 1 和面 2，其中面 1 为罗兰圆中光波传播的终止面，面 2 为波导阵列中波导模式传播的起始面，这两平面是紧靠在一起的，其横向坐标都定义为 ϵ ；波导阵列与右边罗兰圆交界处定义为面 3，其横向坐标也可定义为 ϵ ；右边罗兰圆与输出波导的交界处定义为面 4 和 5，其中面 4 为输出罗兰圆中光波传播的终止面，面 5 为输出波导中光波传播的起始面，这两个面的横向坐标定义为 x 。由于波导阵列中任何两相邻的波导长度差都相同，不同波长的光将聚焦在罗兰圆与输出波导交界的不同位置，因此在交界处不同的位置放置输出波导，将得到不同波长的输出光。

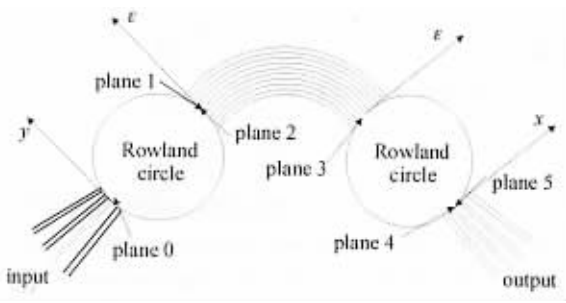


图 1 阵列波导光栅的结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of an AWG

输出波导结构与输入波导完全一样，输出波导间隔 Δx 等于输入波导间隔 Δy 。在推导过程中，假定光波在罗兰圆中的传播为菲涅耳衍射，并忽略了各个边界上的散射与波导阵列中波导之间的耦合以及弯曲波导的弯曲损耗。另外，设在面 0 上的输入场分布为 $E_0(y)$ 。面 1 上光波的电场分布可以通过面 0 上的光波经过菲涅耳衍射得到^[8]，即

$$E_1(\epsilon) = -\frac{j}{\sqrt{\lambda R}} \int_{-\infty}^{\infty} E_0(y) e^{-j\frac{2m\epsilon}{\lambda R} \epsilon y} dy$$

其中 n_s, λ 和 R 分别为平板波导有效折射率、光波波长和罗兰圆焦距。

设面 0 的输入场可写为 $E_0(y) = E_i e^{-\frac{y^2}{\sigma^2}}$ ，其中 σ 为基模模场的半径， E_i 为一常数。则面 4 和面 5 上光波的电场分布为 $E_4(x) = -\sqrt{\frac{2}{\alpha \sigma^2 + 1}} \frac{\sigma^2 \pi E_i}{\lambda R} e^{-\alpha x^2}$

和 $E_5(x) = \sum_{q=0}^{n_{ch}} E_{5q}(x)$ ，其中

$$E_{5q}(x) = E_{5q0} e^{-\frac{(x-x_q)^2}{\sigma^2}}, E_{5q0} = -\sqrt{\frac{1}{\alpha \sigma^2 + 1}} \frac{2\sigma^2 \pi E_i}{\lambda R}$$

$$e^{-\frac{\alpha x^2}{\alpha \sigma^2 + 1}} \sum_{p=0}^M e^{-\frac{2\alpha \epsilon_p^2}{\alpha \sigma^2 + 1} + 2\pi j \left(m \frac{n_c \lambda_0}{n_{c0} \lambda} p - \frac{1}{\alpha \sigma^2 + 1} \frac{n_s \epsilon_p x_q}{\lambda R} \right)}, \alpha = \frac{\pi^2 n_s^2 \sigma^2}{\lambda^2 R^2}, x_q =$$

$\left(q - \frac{n_{ch} - 1}{2} \right) d_{ch}, n_{ch}$ 为通道数目， $d_{ch} = \Delta x$ 为罗兰圆上输出波导间距， n_{c0} 为中心波长 λ_0 在波导中的有效折射率， M 为阵列波导数目， $\epsilon_p = \left(p - \frac{M-1}{2} \right) d$ ， d 为阵列在面 2 处的间距， n_c 为波导的有效折射率， ΔL 为相邻波导长度差。从第 q 个输出波导输出的阵列波导光栅的归一化输出频谱可写为 $P_q(\lambda) = \frac{E_{5q0} E_{5q0}^*}{E_i E_i^*}$ ，写成分贝的形式为 $L_q = 10 \lg P_q(\lambda)$ 。通过公式 $\sigma \approx \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(0.5 + \frac{1}{V-0.6} \right) w^{[5]}$ 求出。其中 V 为波导的归一化 V 值。

图 2 为利用这些公式得出的输出频谱例。计算参量见表 1。

图 2 为利用这些公式得出的输出频谱例。计算参量见表 1。

图 2 为利用这些公式得出的输出频谱例。计算参量见表 1。

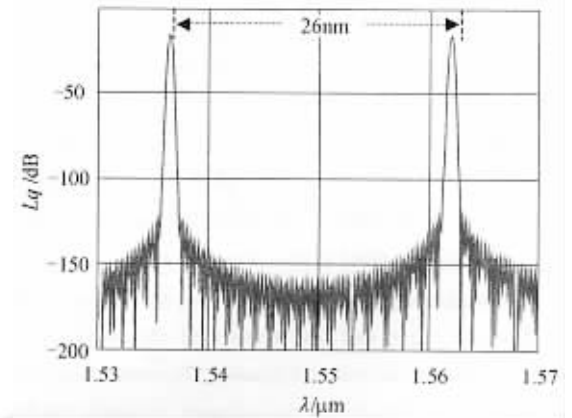


图 2 计算例的输出频谱， $q = 0$
Fig. 2 Output spectrum of the example, $q = 0$

表 1 计算参量

Table 1 Parameters of calculation

	Symbol	Value
Central wavelenth / μm	λ_0	1.55
Wavelength spacing / nm	$\Delta\lambda_{ch}$	1.6
Number of channels	n_{ch}	16
RI of core	n_0	1.507
RI of cladding	n	1.5
FSR / μm	$\Delta\lambda_{FSR}$	26
Width of waveguide / μm	w	5
Pitch of array / μm	d	10
Pitch of output waveguides / μm	d_{ch}	25
Number of array	M	91
Radius of Rowland / μm	R	3924

3 减小相邻信道串扰的方法

从图 2 可知,最大串扰来自相邻信道。对一给定信道,有许多波长在该信道的串扰处于其输出频谱中的极小值上,且这些波长的间距相等或近似相等。如能通过设计使得所有信道中心波长的极小值都处于其他信道的输出波导中心,将大大降低信道之间的串扰,特别是相邻信道之间的串扰。为此,必须通过面 4 上光波的强度分布找出分布规律。任何波长的光波,其在面 4 上的相对强度分布为

$$I_4(x) = \frac{E_4(x)E_4^*(x)}{E_iE_i^*} \quad (1)$$

其分布见图 3。图 3 中,除主极大外还有不少次极大和极小值。如其他输出波导处于面 4 上某信道的中心波长(如该例的 $1.5508 \mu\text{m}$)衍射场的极小值处,则该中心波长在其他信道中产生的串扰会降低。

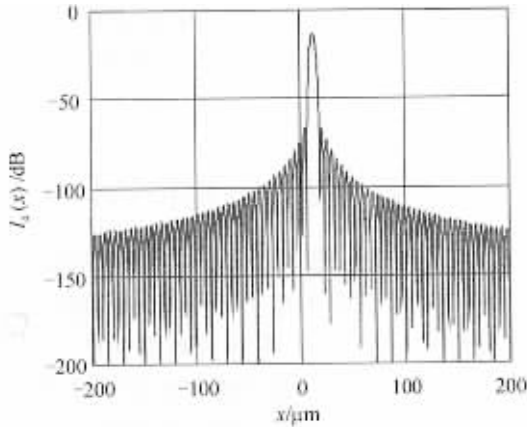


图 3 面 4 上的强度分布 ($\lambda = 1.5508 \mu\text{m}$)

Fig. 3 Distribution of field on plane 4 ($\lambda = 1.5508 \mu\text{m}$)

但从式(1)无法找出满足上述要求的放置输出波导的位置。如果有光场分布,既在面 4 上与式(1)有基本相同的主极大、次极大和极小值的位置,又能方便地从新的光场分布中找出各极值位置,就能够通过新的光场分布得到放置输出波导的位置。为此,设输入光为点光源,即 $E_0'(y) = E_i'\delta(y)$,且波导内的模式为方波,则面 4 上的相对光强分布为

$$I_4'(x) = \frac{\omega^2}{\lambda^2 R^2} \frac{\sin^2\left(\frac{\pi n_s \omega x}{\lambda R}\right)}{\left(\frac{\pi n_s \omega x}{\lambda R}\right)^2} \times \frac{\sin^2\left[M \frac{\pi}{\lambda} \left(n_c \Delta L - n_s d \frac{x}{R}\right)\right]}{\sin^2\left[\frac{\pi}{\lambda} \left(n_c \Delta L - n_s d \frac{x}{R}\right)\right]} \quad (2)$$

将从式(1)和式(2)得到的光场分布表示在同一图

上,见图 4,计算波长 $\lambda = 1.5508 \mu\text{m}$,为第 9 个信道的中心波长。可以看到,除了靠近主极大的少数几个极小值外,式(1)和(2)的极小值位置几乎相同。因此,在输出波导间距比较大的情况下,两式得到的输出波导最佳位置应该相同。从式(2)可得出,某一波长主极大位置在相邻信道波长第 r 个极小值位置上时应满足的条件

$$r \cong \left| \frac{\Delta\lambda_{\text{ch}} M m}{\lambda_0} \right| \cong \frac{\Delta\lambda_{\text{ch}}}{\Delta\lambda_{\text{FSR}}} \frac{n_{s0}}{n_{c0}} M \quad (3)$$

其中 n_{s0} 和 n_{c0} 分别为中心波长在平板波导和条形波导中的有效折射率。 r 同时应满足 $r \times N_{\text{ch}} \leq M$, N_{ch} 为信道数目。此时,与其他情况比较,可望得到较低的串扰。

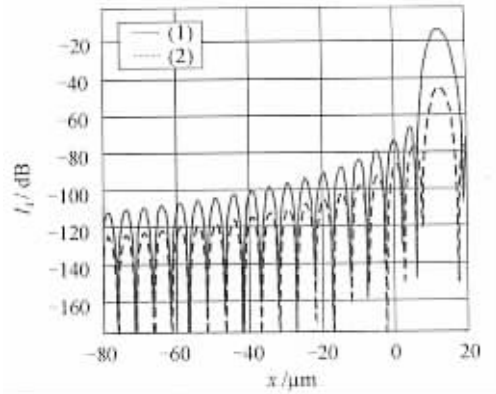


图 4 式(1)和(2)在第 9 输出波导附近的光强分布比较, $\lambda = 1.5508 \mu\text{m}$

Fig. 4 Intensity distribution near the 9th output waveguide calculated by (1) and (2), $\lambda = 1.5508 \mu\text{m}$

4 方法的改进

从式(3)得到的自由光谱范围 $\Delta\lambda_{\text{FSR}}$ 能保证某一信道中心波长在面 4 上的主极大处于其他信道中心波长在面 4 上的极小值的位置,但由于输出波导有一定的宽度,设计参数的选择应该使输出波导对阵列中心的张角足够小,使得在输出波导中只有其他中心波长的极小值,而无其他中心波长的次极大。因此在输出波导宽度确定的情况下,罗兰圆的焦距必须足够大。面 4 上两极小值对阵列波导的张角为

$$\Delta\theta_w = \frac{\lambda}{n_s d M}, \text{ 则罗兰圆焦距 } R \text{ 应满足}$$

$$R \geq \frac{\omega}{\Delta\theta_w} \quad (4)$$

满足式(4)的 R 和式(3)的自由光谱范围可以确保相邻信道的串扰大大降低。在本文的计算例中, R 必须满足 $R \geq 2600 \mu\text{m}$ 。 $R = 2600 \mu\text{m}$ 对应的输出波

导间距 d_{ch} 为 $24.3 \mu\text{m}$ 。选择 $d_{ch} = 25 \mu\text{m}$ 。为此,选择两种极端情况,即 $r = 5$ (对应的自由光谱范围 $\Delta\lambda_{FSR} = 29.17 \text{ nm}$)和 $r = 5.5$ (对应的自由光谱范围 $\Delta\lambda_{FSR} = 26.5 \text{ nm}$),第 9 个输出波导的输出频谱在第 8 个信道的中心波长($1.5492 \mu\text{m}$)附近的详细情况见图 5。从图 5 可看出,在与信道 $1.5508 \mu\text{m}$ 相邻信道的中心波长 $1.5492 \mu\text{m}$ 处, $\Delta\lambda_{FSR} = 29.17 \text{ nm}$ 时输出频谱强度比 $\Delta\lambda_{FSR} = 26.5 \text{ nm}$ 时的约小 $40 \sim 50 \text{ dB}$ 。

较小的自由光谱范围对应较小的噪声底,而某些特定的自由光谱范围对应于较小的相邻信道间的串扰,结合这两点,如果能设计出最小的具有小的相邻串扰的自由光谱范围,则相邻信道之间的串扰有望大大降低。

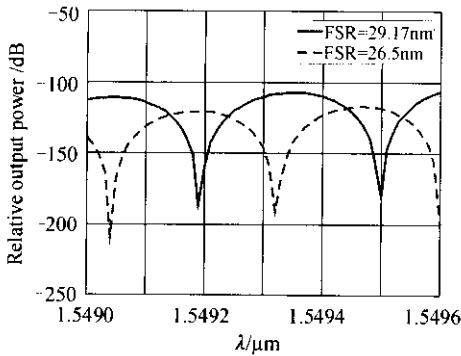


图 5 不同 $\Delta\lambda_{FSR}$ 时 $1.5508 \mu\text{m}$ 相邻信道中心波长在 $1.5492 \mu\text{m}$ 处的输出频谱

Fig. 5 Output spectrum near $1.5492 \mu\text{m}$ with different $\Delta\lambda_{FSR}$

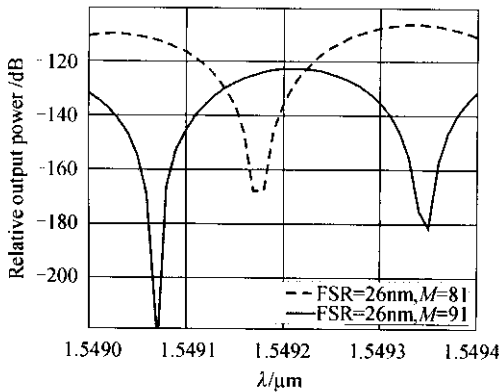


图 6 不同阵列波导数目时 $1.5492 \mu\text{m}$ 附近的输出频谱

Fig. 6 Output spectrum near $1.5492 \mu\text{m}$ with different number of array

考虑到自由光谱范围必须满足 $\Delta\lambda_{FSR} \geq N_{ch}\Delta\lambda_{ch}$, 最小的可能的自由光谱范围为 $N_{ch}\Delta\lambda_{ch}$ 。则

有 $r_{max} = \text{round}\left(\frac{M}{N_{ch}}\right)$, 函数 $\text{round}(X)$ 表示对数 X 取整。由式(3)可得出最小的具有小相邻串扰的自由光谱范围 $\Delta\lambda_{FSR_{min}}$ 。如同时有 $\Delta\lambda_{FSR_{min}} \approx N_{ch}\Delta\lambda_{ch}$, 该自由光谱范围就同时是最小的和具有小相邻串扰的。这要求 $M \approx rN_{ch}$ 。计算例中, 信道数目 $N_{ch} = 16$, 选 $r = 5$, M 可为 81, 自由光谱范围选为 $\Delta\lambda_{FSR} = 26.0 \text{ nm}$ 。图 6 为通过式(1)得到的 $M = 91$ 和 $M = 81$ 时的 $1.5492 \mu\text{m}$ 附近的输出频谱。可以看出, 在自由光谱范围为 26.0 nm , $M = 81$ 时, 相邻信道之间的串扰小。必须注意, $M = 81$ 时输出频谱的极小值并不在 $1.5492 \mu\text{m}$ 处。这是由于 r 比较小时式(1)和(2)的极小值不完全重合, 使得按照式(2)得到的最佳阵列波导数目和自由光谱范围有一定误差。从图 4 可以看到, r 值小时, 式(1)和(2)得到的极小值位置差别较大。因此, 在设计中希望得到较大的 r 值, 使得设计得到的结果与实际相差小。但 r 值越大, 要求罗兰圆的焦距 R 越大。在实际设计中, r 值一般选为 $5 \sim 10$ 。

5 采用光束传播法的模拟结果

式(1)对于实际的设计来说太过理想化。为了验证上两节提出的新的减小相邻信道之间串扰的方法, 采用光束传播法(BPM)进行模拟计算。

选 $M = 91, r = 5$, 则上述方法得到的最佳自由光谱范围 $\Delta\lambda_{FSR} = 29.17 \text{ nm}$ 。选择中心波长为 $1.5508 \mu\text{m}$ 的输出波导, 不同自由光谱范围下的输出频谱见图 7 和图 8。图 8 是图 7 在 $1.5492 \mu\text{m}$ 附近的详细情况。

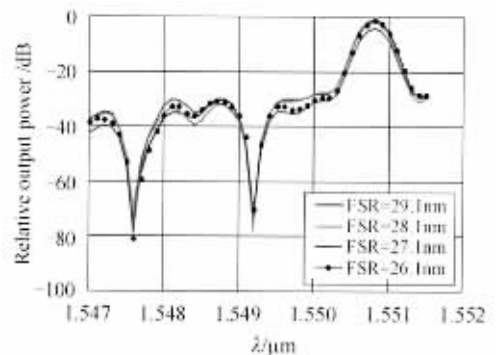


图 7 不同自由光谱范围时的输出频谱

Fig. 7 Output spectrum with different FSR

从图 8 可看出, 除本信道中心波长 ($1.5508 \mu\text{m}$) 外, 在任何自由光谱范围下, 在其他信道中心波

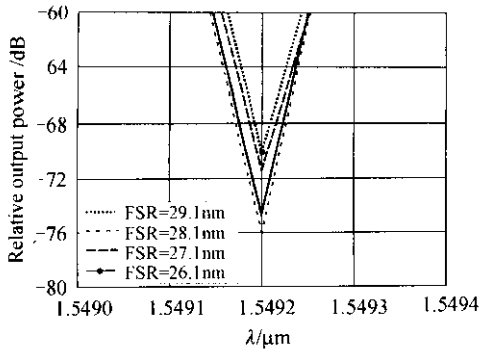


图 8 不同 FSR 时 1.5492 μm 附近的输出频谱

Fig. 8 Output spectrum near 1.5492 μm with different FSR

长处,输出频谱都有极小值。这是由于在阵列波导光栅的设计中,每个信道中心波长的光都设计为聚焦到相应的输出波导中心。在理想的光束传播法模拟计算中,每个信道中心波长及其附近波长的光都聚焦到输出波导范围内,其大多数能量都耦合进相应的输出波导并沿该波导传输。因此,很少的能量耦合进其他波导并以串扰形式表现出来。对非信道中心波长的光,经过罗兰圆聚焦到罗兰圆边上距离输出波导较远处。由于波导芯层和包层的折射率差很小,这些光的小部分能量反射回罗兰圆,大部分能量耦合进输出波导四周的包层中。这些光波将发散到输出波导中,表现为串扰。

从图 8 可以看出,相邻信道之间的串扰在不同的自由光谱范围内还是有比较大的差别的。图 8 显示,不同自由光谱范围内相邻信道中心波长之间串扰差别可达到 6 dB。图中还显示,相邻信道之间串扰最小的自由光谱范围不是计算得到的 29.17 nm,而是 28.1 nm。尽管如此,自由光谱范围为 29.1 nm 时,相邻信道中心波长之间的串扰与最低串扰相差只有 0.5 dB,比其他自由光谱范围的串扰小很

多。最低相邻信道中心波长之间串扰对应的自由光谱范围是 28.1 nm 的原因在上节已经给出。

6 结 论

本文提出了一种降低阵列波导光栅器件相邻信道之间串扰的方法。该方法利用阵列波导光栅的衍射特性,通过设计最优化的 FSR 和阵列波导数目,将每个信道中心波长的衍射极大都设计放置到其他信道的衍射极小处,并通过调节罗兰圆直径使得每个输出波导中没有其他输出波导中心波长的衍射次极大。光束传播法模拟显示,通过该方法,可以使最佳设计时相邻信道之间的串扰比最坏情况减小 5 dB。

参 考 文 献

- 1 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):646~653
- 2 M. S. Borella, J. P. Jue, D. Banerjee *et al.*. Optical components for WDM lightwave networks [J]. *Proc. IEEE*, 1997, **85**(8):1274~1307
- 3 L. Robitaille, C. L. Callender, J. P. Noad. Polymer waveguide devices for WDM applications [C]. *SPIE*, 1998, **3281**:14~24
- 4 E. S. Koteles. Integrated planar waveguide demultiplexers for high-density WDM applications [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 1999, **18**:211~244
- 5 M. K. Smit, C. van Dam. Phasar-based WDM-devices: principles, design and applications [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1996, **2**(2):236~250
- 6 C. K. Nadler, E. K. Wildermuth, M. Lanker *et al.*. Polarization insensitive, low-loss, low-crosstalk wavelength multiplexer modules [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999, **5**(5):1407~1412
- 7 Zhu Daqing, Lu Dongsheng, Xu Zhene *et al.*. Theoretical study of crosstalk for AWGs [C]. *SPIE*, 2001, **4603**:36~41
- 8 M. C. Parker, A. Yiptong, R. J. Mears. A novel active holographic arrayed-waveguide grating for WDM subsystems [C]. *Optical Fiber Communication Conference 2000*, 2000, Vol. 2:77~79