

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0217-05

凹面光栅解复用器的串扰特性分析

郭福源¹ 李连煌¹ 王明华²

¹福建师范大学激光与光电子技术研究所 光子技术福建省重点实验室 医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007
²浙江大学信息科学与工程学院信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027

摘要 凹面光栅解复用器相邻信号通道的串扰由相邻输出光波导之间的横向互耦合效率和输出光波导对相邻信号通道中心波长的响应效率两部分组成。在弱耦合近似条件下, 基于场型分析方法确定的两平行条形光波导之间的横向互耦合系数, 分析了凹面光栅解复用器中两个结构相同的输出光波导之间的互耦合特性, 阐明输出光波导之间的串扰特性与基本结构参数的关系; 根据基于光栅刻面的衍射特性、输入光波导的发射特性和输出光波导的接收特性给出的凹面光栅解复用器信号通道的光谱响应效率函数表达式, 阐明罗兰圆结构凹面光栅解复用器信号通道的光谱响应特性与基本结构参数的关系。这些结论可为确定凹面光栅解复用器的基本结构参数提供理论支持。

关键词 集成光学; 凹面光栅解复用器; 串扰; 耦合效率; 响应效率

中图分类号 TN256; O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s1.0217

Crosstalk Characteristics of Concave Grating Demultiplexer

Guo Fuyuan¹ Li Lianhuang¹ Wang Minghua²

¹Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine of Ministry of Education, Fujian Provincial Key Laboratory of Photonic Technology, Institute of Laser & Optoelectronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China

²Department of Information Science & Electronic Engineering, College of Information Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract The crosstalk between two adjacent signal channels of concave grating demultiplexer is composed of the transverse mutual coupling efficiency between two output waveguides and the response efficiency of output waveguide for the central wavelength of adjacent signal channels. Under the condition of weak coupling approximation, based on the mutual coupling coefficient between two nonparallel rectangular waveguides which derived from the method of field distribution analysis, the mutual coupling characteristic between two identical structure output waveguides in concave grating demultiplexer is discussed, and the relationship between the crosstalk and the basic structure parameters of the output waveguides is clarified. As the spectral response efficiency which is derived from the diffraction factor of grating facet, emission factor of input waveguide and receive factor of output waveguide is employed, the relationship between the spectral response characteristic of the signal channel and the basic structure parameters of the Rowland circle structure concave grating demultiplexer is clarified. These results will provide theoretical support for designing the basic structure parameters of concave grating demultiplexer.

Key words integrated optics; concave grating demultiplexer; crosstalk; coupling efficiency; response efficiency

1 引 言

凹面光栅解复用器^[1~11]由于具有低的理论插入损耗而受到关注, 经典的凹面光栅解复用器信号通道的光谱响应特性分析理论与阵列波导光栅解复

用器特性分析理论相似, 基于凹面光栅衍射焦面多光束干涉谱线与输出波导的标量耦合分析凹面光栅解复用器信号通道的光谱响应特性, 未直接给出表达光谱响应效率的函数表达式; 基于光栅刻面的衍

基金项目: 福建省科技厅 F5 类项目(2007F5040)和国家自然科学基金重点项目(60436020)资助课题。

作者简介: 郭福源(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事光波导理论和光束传输理论及其应用方面的研究。

E-mail: guofy@fjnu.edu.cn

射特性、输入光波导的发射特性和输出光波导的接收特性,可建立凹面光栅解复用器信号通道光谱响应特性的理论模型,给出用于计算信号通道光谱响应效率和通道间串扰的函数表达式^[7,8]。

由于凹面光栅解复用器的输出光波导可认为是非平行条形光波导,非平行条形光波导之间的横向耦合将产生输出通道之间的信号串扰,影响凹面光栅解复用器的特性,因此,开展非平行矩形光波导之间的横向耦合特性研究将有实际应用意义。梁华伟、贾玉斌和韩秀友等^[12~14]根据光波导模式耦合方程组和根据面积积分方法确定的两平行平面光波导间横向互耦合系数等理论分析了非平行直光波导间的横向耦合特性和弯曲光波导间的横向耦合特性,给出一些有应用价值的结论;郭福源等^[15]基于场型分析方法确定的两平行条形光波导之间的横向互耦合系数,分析了阵列波导光栅解复用器中两个非平行光波导之间的互耦合特性。本文开展凹面光栅解复用器输出光波导之间的横向互耦合特性研究,并结合凹面光栅解复用器信号通道的光谱响应效率理论模型,分析了输出光波导对相邻信号通道中心波长光波的响应效率,阐明了凹面光栅解复用器信号通道间的串扰特性与基本结构参数的关系。

2 相邻输入或输出光波导之间的横向互耦合特性

通常,凹面光栅解复用器由平板光波导、光栅刻面、矩形结构的输入光波导和输出光波导组成,如图1所示。光栅刻面中心与输出(或输入)光波导端面中心的关系为罗兰(Rowland)圆结构形式,光栅刻面以标号 j 标注,所有光栅刻面中心均位于以 R 为半径的圆弧2上,光栅刻面法线均指向输入光波

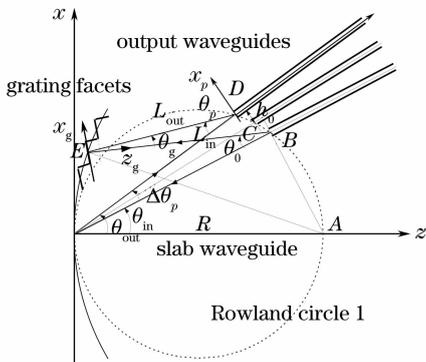


图1 罗兰圆结构凹面光栅解复用器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Rowland structure's concave grating demultiplexer

导端面中心 B , 输出(或输入)光波导以标号 p 标注,其中,输入光波导标号 $p=0$,输入光波导和输出光波导端面中心均位于直径为 R 的罗兰圆1上,波导端面法线均指向标号 $j=0$ 的光栅刻面中心 O 。

凹面光栅解复用器的相邻输出(或输入)光波导为结构和折射率分布完全相同的两个非平行矩形光波导,在弱耦合条件下,相邻矩形非平行光波导之间的互耦合效率可根据基于场型分析求解方法确定的两个矩形光波导之间横向互耦合系数 $K_{2,1}$ 的计算公式确定,以标号为 p 的输出光波导为例,笛卡尔坐标 $x_p D z_p$ 中心与输出光波导端面中心 D 重合, x_p 轴和 z_p 轴分别与光波导端面和光波导对称轴重合,借鉴文献^[13~15]的结论,凹面光栅解复用器的相邻输出光波导之间的横向互耦合效率可表达为

$$\eta_c(z_p) = \sin^2[C(z_p)], \quad (1)$$

式中 $C(z_p)$ 是传输位置 z_p 处的相邻光波导之间的横向互耦合因子,它基于横向互耦合系数 $K_{2,1}$ 的积分形式计算,由于 $OD=R\cos\theta_{out}$, 有

$$C(z_p) = \frac{R\cos\theta_{out}U^2}{\beta ah_0V^2} \exp\left[-W\left(\frac{h_0}{a}-2\right)\right] \times \left[1 - \exp\left(-\frac{Wh_0z_p}{Ra\cos\theta_{out}}\right)\right], \quad (2)$$

式中 $\theta_{out}=\theta_{in}+\Delta\theta_p$ 是标号为 p 的输出光波导对称轴 OD 与 z 轴的夹角, θ_{in} 为输入光波导对称轴 OB 与 z 轴的夹角, $\Delta\theta_p \approx p\Delta\theta$ 为标号为 p 的输出光波导对称轴 OD 轴与输入光波导对称轴 OB 的夹角, $\Delta\theta$ 为相邻输出光波导对称轴之间的夹角, h_0 为相邻输出光波导中心最小间距, a 为输出光波导在 x_p 轴方向的芯层半宽度, β 为输出光波导的传输常数, U 和 W 分别为光波导归一化芯层驻波参量和归一化包层倏逝波参量, $V=k_0(n_1^2-n_2^2)^{1/2}a$ 为光波导归一化频率, n_1 和 n_2 分别为光波导芯层和包层的折射率, $k_0=2\pi/\lambda$ 为真空中波长 λ 光波的波数。

在凹面光栅解复用器中,输出(或输入)光波导的长度较大,为了避免相邻输出光波导之间出现较大的横向互耦合因子而出现输出信号间的串扰,则要求凹面光栅解复用器的参量满足:当 $z_p \rightarrow \infty$ 时,横向互耦合因子 $C(\infty) \ll \pi/2$, 以相邻输出光波导间的串扰小于 -25 dB 为例,由(1)式知,要求横向互耦合因子 $C(\infty) \ll 0.05626$ 。

矩形光波导模式理论为马卡提利(Marcatili)近似理论,光波导模式近似为线偏振模,基模为正交分布的 E_{x0}^o 模和 E_{y0}^o 模,这些模式的场分布分别与平面光波导 TE_0 模和 TM_0 模的场分布具有相似的形

式。根据平面光波导的基本性质,在弱导条件下, $n_1 - n_2 \ll n_1$, 折射率对称阶跃分布的平面光波导的 TE_0 模和 TM_0 模的模场分布差异较小,因此,本文仅采用 TE_0 模的归一化模场分布替代矩形光波导 E_{00}^x 模和 E_{00}^y 模的归一化模场分布分析矩形光波导的特性。

在凹面光栅解复用器计算例子中,光波导以二氧化硅深埋光波导为例,输入光波导和输出光波导均为正方形光波导。光波导的基本参量为 $n_1 = 1.4493, n_2 = 1.4440, a = 3.0 \mu\text{m}, \lambda = 1.55252 \mu\text{m}$, 光波导归一化参量 $V = 1.5035, U = 0.9158, W = 1.1924$ 。若凹面光栅解复用器的罗兰圆直径 $R = 11912 \mu\text{m}$, 标号 $p = 0$ 的输入光波导端面法线 OB 与 z 轴的夹角 $\theta_{in} = 0.5 \text{ rad}$, 由于相邻输出光波导对称轴之间的夹角 $\Delta\theta \ll \theta_{in}$, 则当输出光波导标号 p 较小时,可采用 $\theta_{out} \approx \theta_{in}$ 近似计算相邻输出光波导之间的互耦合特性。由(1)式和(2)式知,当 $z_p \rightarrow \infty$ 时,相邻输出光波导之间的横向互耦合效率 $\eta_c(\infty)$ 随相邻输出光波导中心最小间距 h_0 的变化关系曲线如图2所示。

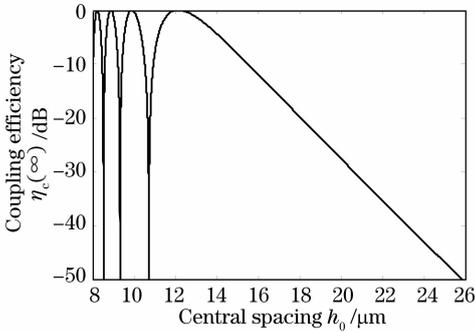


图2 相邻输出光波导中心最小间距与互耦合效率的关系曲线

Fig. 2 Mutual coupling efficiency versus minimal central spacing between adjacent output waveguides

当 $h_0 < 12.16 \mu\text{m}$ 时,横向互耦合因子 $C(\infty) > \pi/2$, 相邻输出光波导之间存在强的耦合,横向互耦合效率 $\eta_c(z_p)$ 随着 z_p 的增加而波动变化,以 $h_0 = 9.35 \mu\text{m}$ 为例, $C(\infty) = 6.2431$, 相邻光波导之间互耦合效率 $\eta_c(z_p)$ 随 z_p 的变化如图3中的虚线所示; 当 $h_0 = 12.16 \mu\text{m}$ 时, $C(\infty) = \pi/2, \eta_c(\infty) = 0 \text{ dB}$, 当 $h_0 > 12.16 \mu\text{m}$ 时,横向互耦合因子 $C(\infty) < \pi/2$, 相邻输出光波导之间的耦合较弱,互耦合效率 $\eta_c(z_p)$ 随着 z_p 的增加单调增加。以 $h_0 = 19.5 \mu\text{m}$ 为例, $C(\infty) = 0.05299, \eta_c(\infty) = -25.52 \text{ dB}$, 相邻光波导之间互耦合效率 $\eta_c(z_p)$ 随 z_p 的变化如图3中的实线所

示,相邻光波导之间的互耦合效率 $\eta_c(z_p) < -25 \text{ dB}$ 。

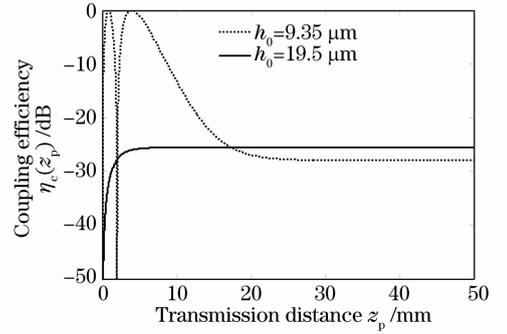


图3 传输距离与互耦合效率的关系曲线

Fig. 3 Mutual coupling efficiency versus transmission distance

3 输出光波导对相邻通道信号的响应特性

根据不等振幅等光程差多光束干涉原理,当忽略光波导材料损耗时,输出光波导接收到的光场可以认为由 $N = 2Q + 1$ 个描述从标号为 $p = 0$ 的输入光波导发射,经过平板光波导传输、标号为 j 的光栅刻面衍射,再经过平板光波导传输,耦合进入标号为 p 的输出光波导的光场的叠加,即,由标号为 $p = 0$ 的输入光波导与标号为 p 的输出光波导组成的凹面光栅解复用器信号通道的光谱响应效率^[7, 8]可表示为

$$\eta_c(p, \lambda) = \left| \sum_{j=-Q}^Q \frac{2n_s b}{\lambda \sqrt{L_{in} L_{out}}} T_{in}(\theta_0) T_g(\theta_g) T_{out}(\theta_p) \times \exp[ik_0 n_s (L_{in} + L_{out})] \right|^2, \quad (3)$$

式中 Q 为光栅刻面的最大标号, n_s 为平板光波导的有效折射率, b 为光栅刻面半宽度,可近似表达为 $b = (h_g/2) \cos \theta_{in}$, L_{in} 为标号为 $p = 0$ 的输入光波导端面中心 B 与标号为 j 的光栅刻面中心 E 之间的距离,可近似表达为 $L_{in} = R \cos \theta_0 - j h_g \sin \theta_{in}$, L_{out} 为标号为 p 的输出光波导端面中心 D 与标号为 j 的光栅刻面中心 E 之间的距离,可近似表达为

$$L_{out} = R \cos \theta_{in} - j h_g \sin \theta_{out},$$

$T_g(\theta_g)$ 为光栅刻面归一化衍射因子,可近似表达为

$$T_g(\theta_g) = \text{sinc}(n_s h_g \cos \theta_{in} \sin \theta_g / \lambda),$$

h_g 为光栅常数, θ_g 为 EB 与 ED 的夹角, θ_0 为 BE 与 BO 的夹角, θ_p 为 DE 与 DO 的夹角, $T_{in}(\theta_0)$ 和 $T_{out}(\theta_p)$ 分别为输入光波导端面发射因子和输出光波导端面接收因子,根据标量衍射积分公式和发射与接收元件特性的互易定律,并以下标 p 代替下标

in 和 out, $T_{\text{in}}(\theta_0)$ 和 $T_{\text{out}}(\theta_p)$ 可采用同一形式^[7] 表示为

$$T_p(\theta_p) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \Psi_p(x_p) \exp(-i2\pi n_s x_p \sin \theta_p / \lambda) dx_p}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} \Psi_p^2(x_p) dx_p \right]^{1/2}}. \quad (4)$$

当输出光波导标号 p 较小时, 以 $p=1$ 为例, 夹角 $\theta_g \approx h_0 / (R \cos \theta_{\text{in}})$, 即 $\theta_g \ll 1$, $T_g(\theta_g) \rightarrow 1$, (3) 式中的衍射因子可以忽略, 当光栅常数 h_g 较小, 光栅刻面数 N 较大时, 若 Nh_g 接近于 R , 光栅刻面接收并衍射输入光波导端面衍射光束的绝大部分能量, 则可将(3)式的累加运算采用积分运算近似表达, 并将积分范围用 $(-\infty, +\infty)$ 近似, 根据函数乘积的傅里叶变换等于傅里叶变换后的卷积的性质, 标号为 p 的输出光波导对相邻信号通道中心波长的归一化响应效率可采用重叠积分形式^[9, 10] 近似表示为

$$\eta_a(h_0) = \left| \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{\text{in}}(x_p) \Psi_{\text{out}}(x_p - h_0) dx_p}{\int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{\text{in}}(x_p) \Psi_{\text{out}}(x_p) dx_p} \right|^2, \quad (5)$$

式中 $\Psi_{\text{in}}(x_p)$ 和 $\Psi_{\text{out}}(x_p)$ 分别为输入光波导和输出光波导归一化模场分布, 它们具有相同的形式, 在光波导芯层 ($|x_p| \leq a$), 场分布 $\Psi_1(x) = \cos(Ux_p/a)$, 在光波导包层 ($|x_p| > a$), 场分布 $\Psi_2(x_p) = \cos(U) \exp[-W(|x_p/a| - 1)]$.

凹面光栅解复用器中标号为 p 的输出光波导对相邻信号通道中心波长的归一化响应效率可近似表示为

$$\eta_a(h_0) = \left(\frac{W}{1+W} \right)^2 \left(\frac{U}{V} \right)^4 \times \left\{ \left(\frac{h_0}{a} - 2 \right) + \frac{4W}{V^2} + \frac{\exp(-2W)}{W} \right\}^2 \times \exp \left[-2W \left(\frac{h_0}{a} - 2 \right) \right]. \quad (6)$$

若光波导基本参数仍为上述给定的参数, 则相邻输出光波导中心最小间距与输出光波导对相邻信号通道中心波长的归一化响应效率的关系如图 4 所示, 随着光波导中心最小间距的增加, 输出光波导对相邻信号通道中心波长的归一化响应效率减少, 当 $h_0 > 13.02 \mu\text{m}$ 时, 归一化响应效率 $\eta_a(h_0) < -25 \text{ dB}$.

由(1)式, (2)式和(6)式知, 当 $h_0 < 57.04 \mu\text{m}$ 时, 输出光波导对相邻信号通道中心波长的归一化响应效率 $\eta_a(h_0)$ 小于相邻输出光波导之间的互耦合

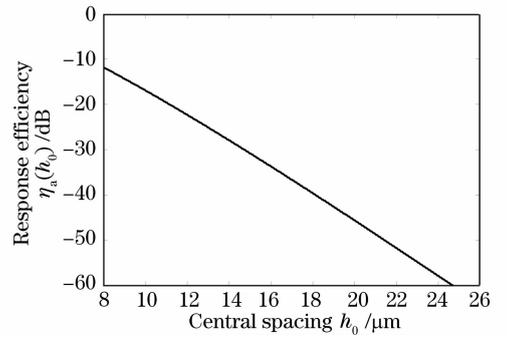


图 4 输出光波导中心最小间距与输出光波导对相邻信号通道中心波长的归一化响应效率的关系曲线

Fig. 4 Normalized response efficiency of the output waveguide for the central wavelength of adjacent signal channel versus the minimal central spacing between two output waveguides

效率 $\eta_c(\infty)$ 。由于凹面光栅解复用器相邻信号通道的串扰由相邻输出光波导之间的横向互耦合效率和输出光波导对相邻信号通道中心波长的响应效率两部分组成, 可见, 在凹面光栅解复用器中, 相邻输出光波导之间的互耦合效率是引起相邻信号通道串扰的主要因素。以 $h_0 = 24 \mu\text{m}$ 为例, 相邻输出光波导之间的互耦合效率 $\eta_c(\infty) = -42.86 \text{ dB}$, 当 N 足够大时, 输出光波导对相邻信号通道中心波长的归一化响应效率 $\eta_a(h_0) = -57.78 \text{ dB}$ 。

4 输出光波导的光谱响应特性

当输入光波导和输出光波导模场分布采用上述的归一化形式表达时, 输入光波导端面发射因子和输出光波导端面接收因子可表示为^[7]

$$T_p(\theta_p) = \left(\frac{\alpha W}{1+W} \right)^{1/2} \frac{V^2}{F_p^2 + W^2} \times \left[\frac{\sin(F_p - U)}{F_p - U} + \frac{\sin(F_p + U)}{F_p + U} \right], \quad (7)$$

式中 $F_p = 2\pi n_s a \sin \theta_p / \lambda$ 为归一化空间频率。

则可根据(3)式和(7)式计算凹面光栅解复用器输出光波导的光谱响应特性。凹面光栅解复用器的光波导基本参数仍以上述给定的光波导参数, 平板光波导在中心波长处的有效折射率 $n_s = 1.4473$, 平板光波导的群折射率 $n_{s,g} = 1.4681$, 凹面光栅解复用器相邻信号通道波长间隔 $\Delta\lambda = 3.2160 \text{ nm}$, 输入光波导对称轴与 z 轴的夹角 $\theta_{\text{in}} = 0.5 \text{ rad}$, 输入输出波导数 $M = 30$, 光栅刻面数 $N = 125$, 干涉级数 $m = 15$, 自由光谱范围 $R_{\text{FS}} = 0.1020 \mu\text{m}$, 光栅常数 $h_g = 16.78 \mu\text{m}$, 光栅刻面半宽度 $b = 7.36 \mu\text{m}$, 罗兰圆直径 $R = 11912 \mu\text{m}$, 相邻输出光波导端面中心最小间

隔 $h_0 = 24 \mu\text{m}$ 。以输出光波导标号 $p = 5$ 为例, $\theta_{\text{out}} = 0.515 \text{ rad}$, 光谱响应曲线如图 5 所示, 输出光波导对该通道中心波长光波的光谱响应度为 -0.59 dB , 输出光波导对相邻信号通道中心波长光波的光谱响应度为 -47.84 dB , 即, 基于输出光波导光谱响应特性计算的相邻信号通道的串扰为 -47.25 dB 。

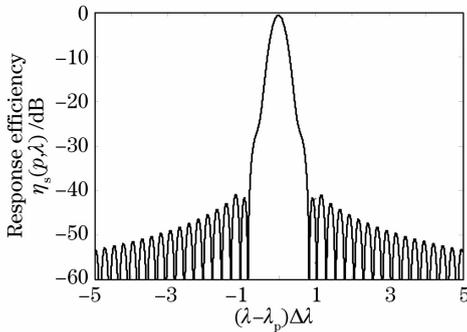


图 5 凹面光栅解复用器输出光波导的光谱响应特性曲线

Fig. 5 Characteristic of spectral response efficiency of output waveguide of concave grating demultiplexer

5 结 论

在弱耦合条件下, 两非平行矩形光波导之间的互耦合效率可根据基于场型分析求解方法确定的两个矩形光波导之间横向互耦合系数 $K_{2,1}$ 的计算公式确定, 由此给出凹面光栅解复用器的相邻输出光波导之间的横向互耦合效率函数表达式, 分析了相邻输出光波导中心最小间距与光波导间横向互耦合特性的关系; 根据基于光栅刻面的衍射特性、输入光波导的发射特性和输出光波导的接收特性确定的凹面光栅解复用器信号通道的光谱响应效率理论模型, 分析了凹面光栅解复用器输出光波导对相邻通道信号的归一化响应效率, 以给定的参数为例, 当相邻输出光波导中心最小间距 h_0 小于某一数值时, 相邻输出光波导之间的横向互耦合效率 $\eta_c(\infty)$ 大于输出光波导对相邻信号通道的归一化响应效率 $\eta_s(h_0)$ 。可见, 在凹面光栅解复用器中, 相邻输出光波导之间的互耦合效率是引起相邻信号通道串扰的主要因素。这些结论可为确定凹面光栅解复用器的基本结构参数提供理论支持。

参 考 文 献

1 Song Jun, He Sailin. A flat-topped etched diffraction grating demultiplexer with low polarization-dependent loss using a tapered MMI structure[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **2**(8): 438~440

2 Wang Daoyi, Yan Yingbai, Jin Guofan. Linear system model for planar concave grating demultiplexer [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2001, **33**(12): 1223~1232

3 McMullin J. N., DeCorby R. G., Haugen C. J.. Theory and simulation of a concave diffraction grating demultiplexer for coarse WDM systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(4): 758~765

4 Sun Z. J., McGreer K. A., Broughton J. N.. Integrated concave grating WDM demultiplexer with 0.144 nm channel spacing[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(13): 1140~1142

5 Chen X. L., McMullin J. N., Haugen C. J. *et al.*. Planar concave grating demultiplexer for coarse WDM [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **237**(1~3): 71~77

6 McGreer K. A.. Diffraction from concave gratings in planar waveguides[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(3): 324~326

7 Guo Fuyuan, Wang Minghua. Spectral response characteristics of concave grating demultiplexer[C]. *SPIE*, 2006, **6351**: 63511R-1~63511R-11

8 Guo Fuyuan, Wang Minghua. Characteristic analysis of the concave grating demultiplexer based on Gaussian approximation [C]. Proceedings of the 5th International Conference on Optical Internet (COIN 2006), 2006. 220~222

9 Song Jun, Mei Weiyan, Wen Hongqiao *et al.*. Analysis of aberration characteristics for etched diffraction grating [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2003, **24**(10): 1103~1108

宋 军, 梅维泉, 文泓桥 等. 刻蚀衍射光栅像差特性分析 [J]. *半导体学报*, 2003, **24**(10): 1103~1108

10 Song Jun, He Sailing, He Jianjun. Analysis of the chromatic dispersion characteristics for an etched diffraction grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 318~322

宋 军, 何赛灵, 何建军. 刻蚀衍射光栅色散特性分析 [J]. *光子学报*, 2003, **32**(3): 318~322

11 Wang Wenhui, Tang Yanzhe, Ge Xiaohong *et al.*. Process of etched-grating demultiplexer based on silicon-on-insulator [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2005, **26**(1): 138~142

王文辉, 唐衍哲, 戈肖鸿 等. 基于 SOI 材料的刻蚀光栅分波器的制作工艺 [J]. *半导体学报*, 2005, **26**(1): 138~142

12 Liang Huawei, Shi Shunxiang, Li Jiali. Theoretical study on coupling between nonparallel waveguides [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(4): 2293~2297

梁华伟, 石顺祥, 李家立. 非平行波导耦合理论研究 [J]. *物理学报*, 2007, **56**(4): 2293~2297

13 Jia Yubin, Hao Yilong. Power exchange between two nonparallel waveguides [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 852~856

贾玉斌, 郝一龙. 两个非平行波导间的能量转换 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(6): 852~856

14 Han Xiuyou, Pang Fufei, Cai Haiwen *et al.*. Performance analysis of planar curved waveguide coupler [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1629~1632

韩秀友, 庞拂飞, 蔡海文 等. 平面弯曲波导耦合器的特性分析 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(11): 1629~1632

15 Guo Fuyuan, Li Lianhuang, Wang Minghua. Crosstalk between two nonparallel waveguides in AWG demultiplexer [C]. *SPIE*, 2008, **7134**: 713417-1~713417-9