

# 消除嵌入半波片的阵列波导光栅残留偏振敏感性的研究

付 旭 冒进斌 许 吉 陆云清 王 瑾

南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210023

**摘要** 提出在阵列波导光栅(AWG)中采用光学非对称平板波导,以消除嵌入半波片的阵列波导光栅中残留偏振敏感性的解决方案。利用传输函数分析在阵列波导中间插入半波片的偏振模式转换过程;以工艺误差使半波片位置不能居中的情形为实例,利用材料的热光效应,调节输入、输出平板波导的双折射率,形成光学非对称平板波导,从而消除了残留的偏振敏感性。针对聚合物材料AWG的模拟结果显示,当输入、输出平板波导的温度差为24 °C时,已可消除32.43 pm的残留偏振敏感性。进一步研究发现,当输入与输出平板波导温度改变量相等但符号相反时,能够很好地避免因温度改变而引起的中心波长漂移。该方法具有结构简单、温控可调等优点,而且还可弥补其他因素造成的因嵌入半波片产生的残留偏振敏感性。

**关键词** 光通信;阵列波导光栅;偏振敏感性;半波片;热光效应

**中图分类号** TN256

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.1113001

## Study of Eliminating Residual Polarization Sensitivity of Array Waveguide Grating with an Embedded Half-Wave Plate

Fu Xu Mao Jinbin Xu Ji Lu Yunqing Wang Jin

School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Post and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China

**Abstract** To eliminate the residual polarization sensitivity of arrayed waveguide grating (AWG) embedded with a half-wave plate, a strategy using optically asymmetrical slab waveguides is proposed. An improved transfer function is given to analyze the polarization mode conversion process with a half-wave plate embedded in AWG. For the exemplary case that the half-wave plate is not embedded in the middle of AWG due to fabrication errors, the thermo-optic effect is utilized to adjust the birefringence of the slab waveguides to realize optical asymmetry of them, and the residual polarization sensitivity is eliminated. For the polymer AWG, the simulation results show that when the temperature difference between the input and output slab waveguides is 24 °C, the residual polarization sensitivity of 32.43 pm can be eliminated. Further the research reveals that the AWG center wavelength drifting can be avoided when the temperature difference of the input and output slab waveguides is equal but with an opposite sign. The proposed method has advantages, such as simple structure and adjustable temperature control, and can also be useful to eliminate the residual polarization sensitivity caused by other factors associated with embedded half-wave plate.

**Key words** optical communications; arrayed waveguide grating; polarization sensitivity; half-wave plate; thermo-optic effect

**OCIS Codes** 130.3120; 050.2770; 160.6840

## 1 引 言

阵列波导光栅(AWG)<sup>[1-7]</sup>因其具有设计灵活、插入损耗低、滤波特性良好、性能长期稳定等优点而广泛应用

收稿日期: 2015-06-04; 收到修改稿日期: 2015-06-24

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20131383)、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(SJLX\_0361)、国家自然科学基金青年科学基金(11404170)

作者简介: 付 旭(1991—),男,硕士研究生,主要从事光通信与聚合物材料方面的研究。E-mail: fuxunupt@163.com

导师简介: 王 瑾(1972—),男,博士,教授,主要从事光纤通信与集成光学器件方面的研究

E-mail: jinwang@njupt.edu.cn (通信联系人)

于光通信技术领域。然而,材料及波导的双折射性会导致AWG对不同偏振态的光信号表现出不同的传输特性,即偏振相关波长频移(PDλS)及偏振相关损耗(PDL),而传输谱上出现的PDλS,会严重影响AWG的性能。

目前,国内外已经报道的关于消除AWG的偏振敏感性的技术主要有:无双折射波导法<sup>[8]</sup>、衍射级次匹配法<sup>[9]</sup>、偏振分束法<sup>[10]</sup>、插入半波片的偏振模式转换法<sup>[11-12]</sup>等。衍射级次匹配法是通过调节AWG阵列波导区上每根阵列波导的宽度来补偿波导的偏振敏感性。但是此方法只能够补偿因波导结构本身产生的双折射性,而对于材料双折射性的补偿能力有限,同时由于每个阵列波导的宽度均不相同,结构较为复杂,对制备工艺的要求较高。偏振分束法<sup>[10]</sup>是对不同偏振态的光束使用不同的阵列波导区衍射级次,并结合平板波导区的结构双折射性来补偿阵列波导区的双折射性,而且其实验结果仍残留有纳米级的PDλS。与上述方法相比较,插入半波片不必减小波导双折射,也不依赖双折射的初值,是目前最实用的方法之一。在AWG的中间位置垂直开一窄槽,将半波片插入其内,并且波片的主轴和波导表面成45°,使横电波和横磁波可以相互转换,从而降低偏振敏感性。但是,插入半波片的方法也有一定的局限性。通常半波片前后结构是不完全对称的,而且工艺误差也使得半波片并不总在居中的位置,相关工作中依然残留有几十皮米的PDλS<sup>[12]</sup>;此外,半波片仅能在一定波长范围对偏振光进行旋转,在有效波长范围以外往往存在残留的PDλS。

在AWG中插入半波片方法的基础上,利用传输函数分析了插入半波片后残留PDλS的来源,并通过构建光学非对称的输入、输出平板波导消除了残留的PDλS。其中光学非对称输入、输出平板波导是利用材料的热光效应分别调节输入、输出平板波导的双折射率而构建的。针对聚合物材料AWG的模拟结果显示,当输入、输出平板波导的温度差为24 °C时,已可消除32.43 pm的残留偏振敏感性,并且,通过调节输入、输出平板波导温度差值的正负,可以消除其中欠补偿或过补偿现象所对应的残留PDλS。本文提出的方法突破了插入半波片方法的局限性,具有结构简单、温控可调等优点,这对AWG器件更加深入的应用具有重要的意义。

## 2 嵌入半波片的AWG传输特性及偏振敏感性

阵列波导光栅由输入、输出平板波导以及阵列波导组成,其传输特性可根据傅里叶光学通过归一化的光强传输函数来表示<sup>[13]</sup>。由于半波片前后的光束偏振态会发生旋转,因此对AWG光强传输函数进行了修正。阵列波导光栅区嵌入半波片后的AWG结构如图1所示:半波片之前光束的偏振态表示为A,输入平板的有效折射率是 $n_{si,A}$ ,阵列波导的有效折射率是 $n_{e,A}$ ;半波片之后光束的偏振态表示为B,阵列波导的有效折射率变为 $n_{e,B}$ ,输出平板波导的有效折射率变为 $n_{so,B}$ 。整个AWG的传输函数可表示为

$$T_{A \rightarrow B} \propto \frac{\sin^2 \left\{ M \pi d \left[ \frac{n_{si,A} x_i}{\lambda R_i} + P \frac{n_{e,A} \Delta L}{\lambda d} + (1-P) \frac{n_{e,B} \Delta L}{\lambda d} - \frac{n_{so,B} x_o}{\lambda R_o} \right] \right\}}{\sin^2 \left\{ \pi d \left[ \frac{n_{si,A} x_i}{\lambda R_i} + P \frac{n_{e,A} \Delta L}{\lambda d} + (1-P) \frac{n_{e,B} \Delta L}{\lambda d} - \frac{n_{so,B} x_o}{\lambda R_o} \right] \right\}} \text{sinc}^2 \left[ W_{wg} \left( \frac{n_{si,A} x_i}{\lambda R_i} - \frac{n_{so,B} x_o}{\lambda R_o} \right) \right], \quad (1)$$

式中 $P$ 表示阵列波导上半波片位置参数,其值在0(即输入平板波导输出端)到1(即输出平板波导输入端)之间,而0.5表示半波片在阵列波导区中间位置; $M$ 为阵列波导数目, $W_{wg}$ 为单根波导的宽度, $d$ 为相邻波导的间隔, $x_i(x_o)$ 表示输入(输出)位置, $R_i(R_o)$ 表示输入(输出)平板波导罗兰圆半径, $n_{si}(n_{so})$ 为输入(输出)平板波导有效折射率, $\Delta L$ 为AWG相邻阵列波导间的长度差。

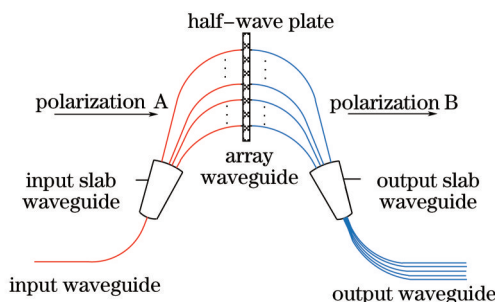


图1 嵌入半波片的AWG结构示意图

Fig.1 Structure of AWG with a half-wave plate

根据(1)式可以得到阵列波导光栅的色散方程为

$$m\lambda = \frac{n_{s_i, A} d_i x_i}{R_i} + P n_{g, A} \Delta L + (1-P) n_{g, B} \Delta L - \frac{n_{s_o, B} d_o x_o}{R_o}, \quad (2)$$

偏振相关波长漂移量  $\lambda_{PDS}$  可以表示为

$$\lambda_{PDS} = \lambda_{TE} - \lambda_{TM} = \left[ \frac{B_{s_i} d_i x_i}{R_i} + (2P-1) B_g \Delta L + \frac{B_{s_o} d_o x_o}{R_o} \right] / m, \quad (3)$$

式中  $B_g = n_{g, TE} - n_{g, TM}$ ,  $B_{s_i} = n_{s_i, TE} - n_{s_i, TM}$ ,  $B_{s_o} = n_{s_o, TE} - n_{s_o, TM}$  分别表示阵列波导区、输入平板波导区、输出平板波导区 TE 模与 TM 模之间有效折射率差,  $d_i(d_o)$  表示阵列波导输入端(输出端)波导间隔。通常情形下, 阵列波导光栅是对称结构即  $R_i = R_o = R$ ,  $d_i = d_o = d$ , 对于中心波长而言, 输入位置等于输出位置  $x_i = -x_o$ 。(3)式可化简为

$$\lambda_{PDS} = (2P-1) B_g \Delta L + \frac{d x_i (B_{s_i} - B_{s_o})}{R}. \quad (4)$$

从(4)式可看出, 残留的  $\lambda_{PDS}$  与半波片位置  $P$  相关。在理想情况下, 输入、输出平板波导的双折射率一致, 当半波片被嵌入对称 AWG 结构的正中, 即  $P=0.5$ , 则有  $\lambda_{PDS}=0$ 。在非理想情况下, 例如工艺误差使半波片位置不居中, 即  $P \neq 0.5$ , 导致 AWG 依然残留一定的偏振敏感性 ( $\lambda_{PDS} \neq 0$ )。当半波片位置偏离 AWG 中间且靠近输入平板波导区, 即  $P < 0.5$ , 会导致欠补偿现象 ( $\lambda_{PDS} < 0$ ), 如图 2(a) 所示; 当半波片位置偏离 AWG 中间且靠近输出平板波导区,  $P > 0.5$  时, 导致过补偿现象 ( $\lambda_{PDS} > 0$ ), 如图 2(b) 所示。

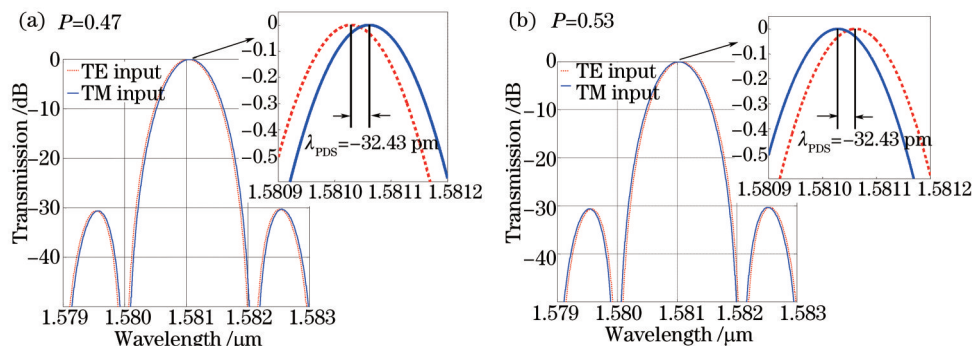


图 2 TE、TM 模式的传输特性。(a)  $P=0.47$  (b)  $P=0.53$

Fig.2 Transmission characteristics of TE, TM. (a)  $P=0.47$ ; (b)  $P=0.53$

同时, (4)式也给出了完全消除 AWG 偏振敏感性的可行方法, 即通过调节  $(B_{s_i} - B_{s_o})$  来补偿残留的偏振敏感性。值得一提的是, 残留的偏振敏感性不仅仅由不理想的半波片位置引起, 也可由半波片前后结构不完全对称引起, 即  $R_i \neq R_o$ ,  $d_i \neq d_o$ ; 此外, 半波片对偏振光旋转仅在一定波长范围有效也会导致在 AWG 的工作波段依然有残留的偏振敏感性。下文将讨论如何实现  $(B_{s_i} - B_{s_o})$  的调节。

### 3 采用非对称平板波导消除 AWG 残留偏振敏感性

利用聚合物材料的热光效应获得 AWG 输入、输出平板波导非对称的折射率, 实现  $(B_{s_i} - B_{s_o})$  的调节, 从而完全消除 AWG 的偏振敏感性。图 3(a) 给出了聚合物材料的双折射率  $B$  与温度  $T$  的关系<sup>[9]</sup>:

$$B(T) = 10^{-3} + k(T - 20), \quad (5)$$

式中常数  $k = -5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , 从(4)和(5)式可得

$$(2P-1) B_g \Delta L + \frac{k d x_i (T_i - T_o)}{R} = 0. \quad (6)$$

因此, 通过调节输入、输出平板波导的温度  $T_i$  与  $T_o$ , 改变输入、输出平板波导的双折射率, 可消除 AWG 残留偏振敏感性。而且  $(T_i - T_o)$  值的正负可以分别消除相应的欠补偿或过补偿现象。

如图 3(b) 所示, 设计的 AWG 中, 在输入、输出平板波导上加入了电极, 以实现光学非对称的平板波导。在  $20^\circ\text{C}$  时, 平板波导对 TE、TM 模式的有效折射率分别为 1.4676 和 1.4666, 阵列波导对 TE、TM 模式的有效折射率分别为 1.45833 和 1.45733。单根波导宽度  $W_{wg} = 6 \mu\text{m}$ , 阵列波导数  $M=41$ ,  $B_g = 1 \times 10^{-3}$ ,  $\Delta L = 20 \mu\text{m}$ ,  $R = 800 \mu\text{m}$ ,

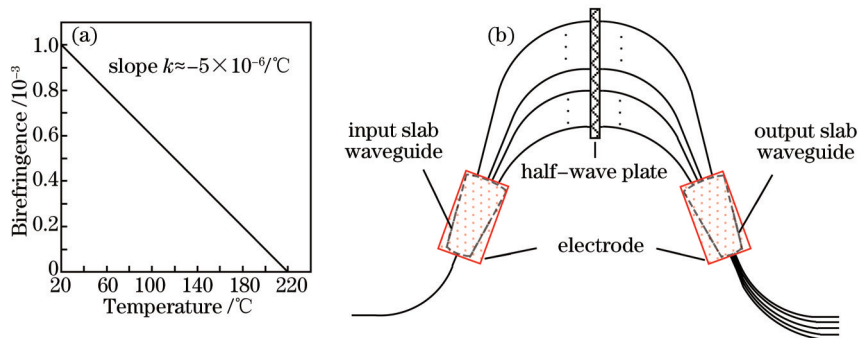


图 3 (a) 聚合物材料双折射率随温度的变化; (b) 加入电极的 AWG 结构示意图

Fig.3 (a) Birefringence of polymer changes with the temperature; (b) structure of AWG with electrodes

$d=40 \mu\text{m}$ ,  $x_i=200 \mu\text{m}$ 。当  $P=0.47$  时, 从(6)式可得出  $T_o-T_i=24 \text{ }^\circ\text{C}$ , 如果输入平板波导的温度  $T_i$  保持在  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 只要增加输出平板波导温度  $T_o$  到  $44 \text{ }^\circ\text{C}$ , 就能消除残留偏振敏感性。同样, 当半波片过补偿, 如  $P=0.53$  时, 通过计算得出  $T_o-T_i=-24 \text{ }^\circ\text{C}$ , 则  $\lambda_{\text{pds}}=0$ 。(1)式的传输函数模拟了这 2 种情况下 TE、TM 模式的传输特性, 可以针对不同的残留偏振敏感性, 即欠补偿或过补偿, 进行实时调控。

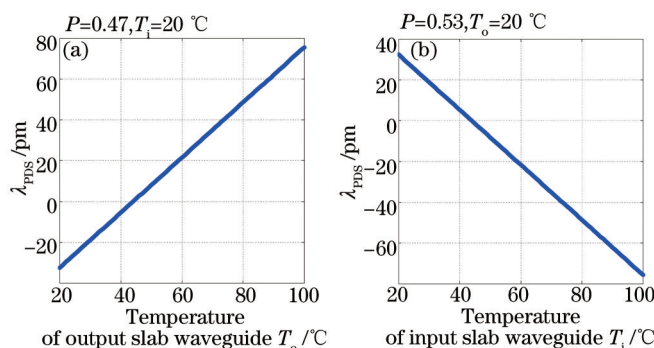


图 4 (a)  $P=0.47, T_i=20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{\text{pds}}$  随输出平板波导温度  $T_o$  的改变; (b)  $P=0.53, T_o=20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{\text{pds}}$  随输入平板波导温度  $T_i$  的改变

Fig.4 (a)  $P=0.47, T_i=20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{\text{pds}}$  versus the temperature of output slab waveguide  $T_o$ ;

(b)  $P=0.47, T_o=20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{\text{pds}}$  versus the temperature of input slab waveguide  $T_i$ .

图 4(a)和(b)给出了计算出的  $\lambda_{\text{pds}}$  与输出、输入平板波导温度变化的关系。与之前实验工作<sup>[9-12]</sup>相比较, 通过改变输入平板波导与输出平板波导的温度可以完全消除阵列波导光栅偏振敏感性, 而且可以针对不同的残留偏振敏感性, 即欠补偿或过补偿, 进行实时调控。

如图 5 所示, 改变输入、输出平板温度  $T_i$ 与  $T_o$ 可消除残留的偏振敏感性, 但也会影响 AWG 的衍射及传输特性, 使得其中心波长发生漂移。这样的中心波长漂移可通过改变 AWG 的工作温度来消除。

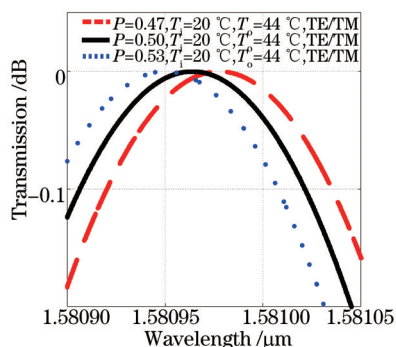


图 5 工作温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 改变输入、输出平板波导温度后工作中心波长的漂移

Fig.5 Center wavelength drifts with the change of the temperature of input and output slab waveguides, while the AWG operating temperature is  $20 \text{ }^\circ\text{C}$

假设不同偏振态下, AWG 各部分的材料折射率对温度的变化率一致, 即热光系数相同, 根据(2)式, AWG 波长随温度的变化情况可以表示为

$$m\Delta\lambda(T) = \frac{d_i x_i \partial n_{si}(T_i)}{R_i \partial T_i} \Delta T_i + \Delta L \frac{\partial n_g(T_g)}{\partial T_g} \Delta T_g - \frac{d_o x_o \partial n_{so}(T_o)}{R_o \partial T_o} \Delta T_o, \quad (7)$$

式中  $T_g$  表示阵列波导部分的温度,在上述过程中,阵列波导部分的温度  $T_g$  并未发生改变(即  $\Delta T_g = 0$ ),可以将其看作 AWG 的工作温度。为了使得中心波长不随温度漂移,即  $\Delta\lambda = 0$ ,由(7)式可得

$$\Delta T_i + \Delta T_o = 0. \quad (8)$$

换言之,输入、输出平板波导的温度差为  $\Delta T = T_i - T_o$ ,并通过正负温差的控制使得  $\lambda_{pds} = 0$ ,为了使得中心波长不发生漂移,那么输入平板波导的工作温度可为  $T_g + \Delta T/2$ ,输出平板波导的工作温度为  $T_g - \Delta T/2$ 。如图 6 所示,在不同工作温度  $T_g$  时,以半波片在阵列波导中间位置即  $P=0.5$  时的工作中心  $\lambda_0$  为参考,无论是过补偿还是欠补偿,当输入平板波导温度与输出平板波导温度的变化满足(8)式,中心波长都不会发生漂移。

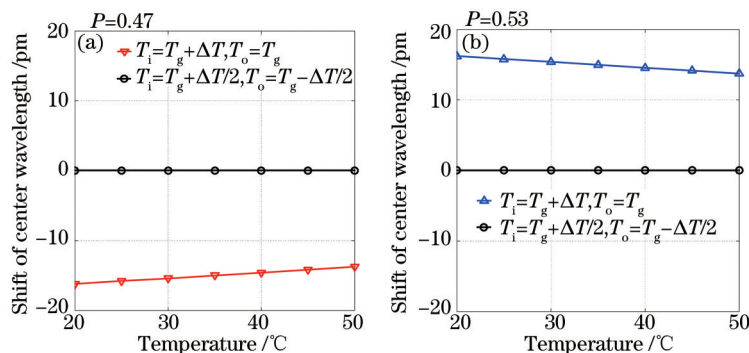


图 6 中心波长漂移随温度变化

Fig.6 Center wavelength versus the temperature

在实际应用中,AWG 工作中心波长需要通过调节工作温度  $T_g$  来设定,而本文提出的方法是通过改变输入平板波导温度  $T_i$  及输出平板波导温度  $T_o$  来补偿残留的偏振敏感性,因此,在实际应用中可以考虑使用 3 块电极分别对输入平板波导、阵列波导、输出平板波导进行加热,在此不再赘述。

## 4 结 论

对嵌入半波片的阵列波导光栅的传输函数进行了修正;通过理论推导,提出通过构建光学非对称的 AWG 输入、输出平板波导,可以补偿嵌入半波片后残留的偏振敏感性;以工艺误差使半波片位置不能居中的情形为实例,在输入、输出平板波导上加入电极,利用材料热光效应,实现了对残留偏振敏感性的补偿,而且当输入与输出平板波导温度改变量相等但符号相反时,能够很好地避免温度改变而引起的中心波长漂移。该方法结构简单、温控可调,不仅可消除半波片位置不能居中而导致的残留偏振敏感性,而且能够消除由于半波片前后结构不完全对称、半波片仅在一定波长范围对偏振光有效地旋转等情形所残留的偏振敏感性,这对 AWG 器件更加深入的应用与发展具有重要的指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Smit M K. New focusing and dispersive planar component based on an optical phased array[J]. Electron Lett, 1988, 24(7): 385-386.
- 2 Takahashi H, Suzuki S, Kato K, *et al.*. Arrayed-waveguide grating for wavelength division multi/demultiplexer with nanometer resolution [J]. Electron Lett, 1990, 26(2): 87-88.
- 3 Wang Lei, Li Ran, Niu Xiaoyan, *et al.*. Research and fabrication of an ultraviolet curable polymeric arrayed waveguide grating with nonlinear cladding [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0805002.  
王 雷, 李 然, 牛小艳, 等. 非线性包层结构紫外固化聚合物阵列波导光栅研制[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0805002.
- 4 Han Chao, Yue Yuanbin, Zhao Shimin, *et al.*. Design and fabrication of 650 nm arrayed waveguide grating[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0323002.
- 5 Zhao Jianyi, Chen Xin, Qian Kun, *et al.*. Design and fabrication of 16 channel 200 GHz InP based array waveguide gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0605002.

- 赵建宜, 陈 鑫, 钱 坤, 等. InP基16通道200 GHz阵列波导光栅的设计和制备[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0605002.
- 6 Zhou Yumeng, Qiu Kun, Xu Bo, *et al.*. Path design of Clos network based on device constraint in large capacity optical switches[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0806003.
- 周宇萌, 邱 昆, 许 渤, 等. 超大容量光交换机中器件约束的Clos网络路径设计[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0806003.
- 7 An Junming, Zhang Jiashun, Wang Yue, *et al.*. Study on wavelength division multiplexer for silicon photonics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 110006.
- 安俊明, 张家顺, 王 玥, 等. 硅光子中波分复用技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 110006.
- 8 Soole J B D, Amersfoort M R, Leblanc H P, *et al.*. Polarization-independent InP arrayed waveguide filter using square cross-section waveguides[J]. Electron Lett, 1996, 32(4): 323-324.
- 9 Maru K, Okawa M, Abe Y, *et al.*. Silica-based 2.5% $\Delta$  arrayed waveguide grating using simple polarization compensation method with core width adjustment[J]. Electron Lett, 2007, 43(1): 26-27.
- 10 Zou Jun, Jiang Xianxin, Xia Xiang, *et al.*. Ultra-compact birefringence-compensated arrayed waveguide grating triplexer based on silicon-on-insulator[J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(12): 1935-1940.
- 11 Takahashi H, Hibino Y, Nishi I. Polarization-insensitive arrayed-waveguide grating wavelength multiplexer on silicon[J]. Opt Lett, 1992, 17(7): 499-501.
- 12 Zhang Ziyang, Mettbach N, Zawadzki C, *et al.*. Polymer-based photonic toolbox: Passive components, hybrid integration and polarization control[J]. IET Optoelectronics, 2011, 5(5): 226-232.
- 13 Lu Ping, Liu Deming, Cao Qian, *et al.*. Arrayed waveguide grating linear system theory analysis and design[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(7): 804-808.
- 鲁 平, 刘德明, 曹 倩, 等. 阵列波导光栅线性系统理论分析及优化设计[J]. 光学学报, 2003, 23(7): 804-808.
- 14 Wang Jin, Zawadzki C, Mettbach N, *et al.*. Polarizations insensitive 25 Gbaud direct D(Q)PSK receiver based on polymer planar light wave hybrid integration platform[J]. Opt Express, 2011, 19(13): 12197-12207.

栏目编辑: 王晓琰