

文章编号: 0258-7025(2004)11-1398-05

双通道光环行器结构的设计及理论分析

田燕宁¹, 方强², 王永昌¹

(¹ 西安交通大学现代物理研究所, 陕西 西安 710049; ² 西安邮电学院电信系, 陕西 西安 710061)

摘要 提出了一种双通道式多功能光环行器, 在结构设计中插入了双尾纤及透镜对, 实现了器件功能复用, 降低了制造成本与占空比。在理论上用琼斯矩阵对光环行器的插入损耗及隔离度等性能参数进行分析, 探讨了影响该双通道光环行器隔离度、插入损耗特性的因素, 结果表明, 双通道多功能光环行器在器件镀增透膜的基础上具有与传统单通道光隔离器相同低插入损耗和高隔离度等特性。

关键词 光电子学; 光环行器; 双尾纤; 透镜对; 插入损耗; 隔离度

中图分类号 TN 929.1 **文献标识码** A

Structure and Characteristics of a Double Function Optical Circulator with Double Fiber Tip and Lens Twice

TIAN Yan-ning¹, FANG Qiang², WANG Yong-chang¹

(¹ Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China
² Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

Abstract A new type of double function optical circulator for double fibers is proposed in this paper. Two fiber tips and lens twice are employed in this kind of device. Because two fiber tips and lens twice are used, the function of optical circulator is duplicated in comparison with conventional optical circulator with single fiber tip. Thus the optical circulator has a low cost and a small volume comparatively. Typical insertion loss and isolation of the developed circulator are analyzed and discussed by using Jones-Matrix in theory. The analysis results show that the above two characteristics are as good as conventional optical circulator's characteristics. The isolation is increasing with increment of extinction ratio. The surface reflectivity and material absorption are the main source of the insertion loss. The rotator errors of the rotators have an important effect on the isolation. The higher the errors, the lower the isolation. It's very important for using optical material with high transmission and high extinction ratio to achieve low insertion loss and high isolation. Also the rotation error of the rotators must be reduced in assembly to win low insertion loss and high isolation. Details of design and high characteristics of this circulator are presented.

Key words optoelectronics; optical circulator; double fiber tip; lens twice; insertion loss; isolation

1 引言

光环行器是一种多端口输入输出的非互易型光无源器件, 具有光信号沿规定的顺序端口正向传输导通, 反向禁止的特性, 同时具有光环行、光耦合及光隔离等功能, 且插入损耗、隔离度性能良好, 广泛应用于光通信中的光放大器、密集波分复用

(DWDM)、光时域反射计(OTDR)及双向通信系统中^[1~8]。但目前的光环行器均由单尾纤、双折射晶体及旋光器件组成^[9,10], 制造成本较昂贵, 限制了其应用。本文提出的双通道光环行器输入端口由传统单尾纤转换为双尾纤, 并增加了与双尾纤对应的透镜对, 在这些新器件的应用基础上, 双折射晶体及旋光器等器件的功能复用, 使得双通道光环行器在单

收稿日期: 2003-07-31; 收到修改稿日期: 2003-12-05

作者简介: 田燕宁(1974—), 女, 陕西省富平县人, 西安交通大学博士研究生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。
E-mail: tianniu@mailst.xjtu.edu.cn

尾纤光环形器具有的高隔离、高插入损耗和低回波损耗的良好性能参数上,大幅度降低光环形器的相对制造成本和占空比。

2 结 构

设计的双通道光环形器的结构如图 1 所示。其中 B_1, B_2, B_3 和 B_4 为双折射晶体, B_1, B_2 对于入射光/出射光都具有分光/合光作用, B_1 和 B_2 中 o 光, e 光光束的偏振状态方向如图 2 所示; B_3 和 B_4 具有光束引导作用, 二者中的 o 光偏振方向为 x 轴, e

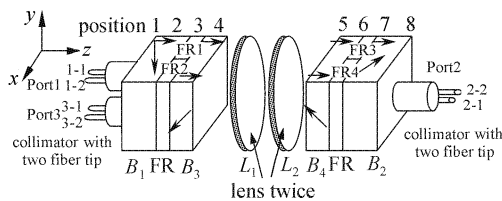


图 1 双通道式光环形器结构

Fig. 1 Structure of the optical circulator with double fiber tip and lens twice

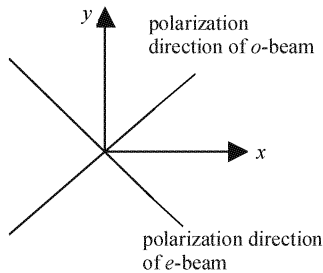


图 2 双折射晶体 B_1 和 B_2 内光的偏振方向示意图

Fig. 2 Polarization state for B_1 and B_2 crystals

光方向为 y 轴, B_1, B_2 与 B_3, B_4 的光轴夹角为 45° 。法拉第旋转器(FR)由两块旋光方向相反的法拉第旋光晶体组成, 旋转角度为 45° , 其中 FR1 和 FR4 是右旋, FR2 和 FR3 是左旋法拉第旋光器件, FR1 和 FR2 合成一块放于 B_1 后, 沿 y 轴方向分割, 使得经过 B_1 分束的两束光分别通过, FR3 和 FR4 合成一块放于 B_2 前。法拉第旋转器的非互易旋光性能和 B_3, B_4 的光束引导功能使得器件具有端口之间的环行功能。透镜对 L_1, L_2 相邻焦点重合, 光轴重合, 光轴方向沿 z 轴, 具有空间光交叉作用。端口 1, 端口 2 和端口 3 均由带双尾纤准直透镜组成, 三个端口的纤芯距相同。双尾纤与自聚焦透镜位于 2 倍焦点以外, 对应于双尾纤的透镜对的使用使得各端口之间的尾纤一一对应, 所以透镜对、双尾纤及自聚焦透镜一起实现了各元器件的功能复用作用, 并可使光

束在各通道内具有环行功能, 成功设计了双通道 3 端口光环形器。

3 工作原理

端口 1 到端口 2 的光路传输过程中光束在各元器件表面偏振态及位置如图 3 所示, 其相应位置与图 1 中所示序号的端面位置相同, 不同灰度表示不同通道间的传输光束。从端口 1 两个通道入射的两束任意偏振光(位置 A_1), 在通过晶体 B_1 后被分解为两组偏振态相互垂直的线偏振光, 一组为 o 光, 另一组为 e 光(位置 A_2), o 光相应位置没有变化, 由于光轴与 x 轴夹角为 45° , 所以 e 光在 x 轴和 y 轴都有位移偏离, 到达 FR 时分别通过 FR1 和 FR2。这两束光通过法拉第旋光晶体 FR1 和 FR2 后, 偏振态分别被顺时针/逆时针旋转 45° , 使得通过之后的两束光的偏振态相同(位置 A_3), B_3, B_4 晶轴的设置使两组 x 方向的偏振光在内部为 o 光, 因而两组光在 x 方向无位移且偏振态没有变化地通过 B_3 和 B_4 晶体。在通过透镜对 L_1, L_2 时, 两组光以透镜对的相邻焦点为中心在位置 4, 5 上发生空间光交叉变化, 如图位置 A_4 与 A_5 所示的关系。两组光接着分别通过顺时针/逆时针 45° 法拉第旋光晶体, 两束光之间的偏振态再次互相垂直, 对于 B_2 晶体而言, 一组光为 o 光, 另一组光为 e 光, 通过 B_2 后合成两束光耦合进相应的光纤输出。于是实现了由端口 1 到端口 2 的功能。

端口 2 到端口 3 的光路传输过程中光束在各元器件表面偏振态及位置如图 4 所示, 其相应位置与图 1 中所示序号的端面位置相同, 不同灰度表示不同通道间的传输光束。从端口 2 入射的任意偏振光(位置 B_8), 在通过晶体 B_2 后被分解为两束偏振态相互垂直的线偏振光, 一束为 o 光, 另一束为 e 光(位置 B_7)。这两束光通过非互易法拉第旋光晶体 FR3 和 FR4 后, 偏振态分别被顺时针/逆时针旋转 45° , 使得通过之后的两束光的偏振态相同(位置 B_6), 由于法拉第旋光器件的非互易性, 这两束 x 方向的偏振光的偏振态垂直于图 3 位置 A_6 中两束光的偏振态, 光束对于 B_3 来说是 e 光, 所以通过 B_4 晶体时在 y 方向上位移变化(位置 B_5), 与图 3 位置 A_5 中所示的光束位置在 y 方向上有所位移。而通过透镜对 L_1, L_2 , 两束光发生空间光交叉, 如位置 B_5 与位置 B_4 所示的关系。再通过 B_3 晶体时在 x 方向上再次发生位移变化(位置 B_3), 接着分别通过顺时针、逆时

针 45° 法拉第旋光晶体, 这两束光的偏振态再次互相垂直, 对于 B_1 晶体而言, 一组光为 o 光, 另一组光为 e 光, 通过 B_1 后合成为两束光输出(位置 B_1)。端

口 3 的光束输出位置与端口 1 在 y 方向上有位移, 于是实现了由端口 2 到端口 3 的光束传输功能, 具有端口 1→2→3 的光束环行功能。

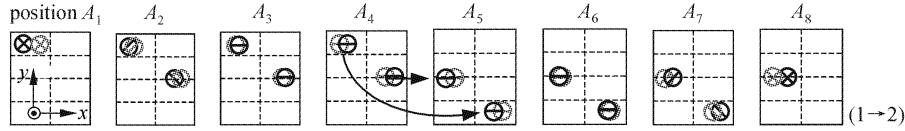


图 3 光束由端口 1 到端口 2 传输中各端面的光束偏振态及位置示意图

Fig. 3 Cross-section view for polarization state at each position from port 1 to port 2

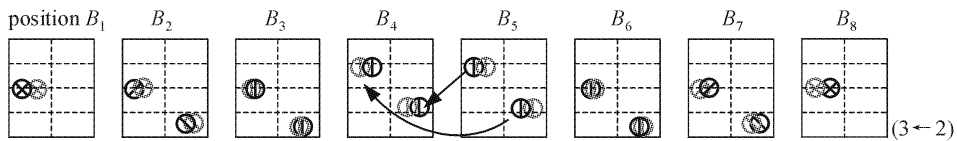


图 4 光束由端口 2 到端口 3 传输中各端面的光束偏振态及位置示意图

Fig. 4 Cross-section view for polarization state at each position from port 2 to port 3

4 性能分析

在光通信中, 环形器的主要性能参数为隔离度和插入损耗, 而影响这两个性能参数的因素有器件的透射比、消光比和各旋转器件的旋转误差。

依据坐标系选取, 由矩阵光学推得:

B_3, B_4 晶体中 o, e 光的琼斯矩阵分别为

$$C_o = t_c \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e_c \end{bmatrix}, C_e = t_c \begin{bmatrix} e_c & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

B_1, B_2 晶体中 o, e 光的琼斯矩阵分别为

$$C'_o = \frac{1}{2} t_c \begin{bmatrix} 1 + e_c & 1 - e_c \\ 1 - e_c & 1 + e_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C'_e = \frac{1}{2} t_c \begin{bmatrix} 1 + e_c & e_c - 1 \\ e_c - 1 & 1 + e_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

t_c, e_c 分别为 B_1 和 B_2 晶体的透射比与消光比。法拉第旋光器的琼斯矩阵为

$$F(\beta) = t_F \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -je_F \\ je_F & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

t_F, e_F 分别为法拉第旋光晶体的透射比与消光比, β 为旋光角度。透镜对是各向同性器件, 表示其光束传输的矩阵为

$$L = t_L \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

FR1, FR2, FR3 和 FR4 的旋转角度为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 和 α_4 , 旋转角度误差分别为 $\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, \Delta\alpha_3$ 和 $\Delta\alpha_4$ 。 $\alpha_1 = 45^\circ + \Delta\alpha_1, \alpha_2 = 45^\circ + \Delta\alpha_2, \alpha_3 = 45^\circ + \Delta\alpha_3, \alpha_4 = 45^\circ + \Delta\alpha_4$ 。

4.1 消光比对双通道光环行器性能参数的影响

4.1.1 消光比对插入损耗的影响

设旋转角度误差 $\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_2 = \Delta\alpha_3 = \Delta\alpha_4 = 0$ 。

端口 1 到端口 2:

$$E_{out} = E_o + E_e = C'_o F(\alpha_1) C_o L C_o F(\alpha_4) C'_e E_{in} + C'_e F(-\alpha_2) C_o L C_o F(-\alpha_3) C'_e E_{in} = t_L t_c^4 t_F^2 \times \begin{bmatrix} 1 - e_c^4 & 0 \\ 0 & -1 + e_c^4 \end{bmatrix} E_{in} \quad (6)$$

插入损耗

$$IL = -80 \lg t_c - 40 \lg t_F - 20 \lg t_L - 20 \lg(1 - e_c^4) = L_o + L_e \quad (7)$$

其中

$$L_o = -80 \lg t_c - 40 \lg t_F - 20 \lg t_L = L_c + L_F + L_L$$

上式的插入损耗由两部分组成: 一部分是各器件的表面反射及吸收组成的透射比引起的插入损耗总和, 由 L_o 表示, 为环形器的固有插入损耗; 另一部分为消光比引起的插入损耗, 由 L_e 表示。由于消光比的数值 $e_c \approx 10^{-5}$, 对插入损耗的影响远小于透射比; 由于透镜对的应用, 双通道光环行器相对于单尾纤光环行器在器件上附加插入损耗由透镜对引起, 而透镜对引起的插入损耗相比于其他器件引起的总的插入损耗较小, 所以对双通道光环行器插入损耗的影响较小。

4.1.2 消光比对隔离度的影响

反向传输

$$E'_{\text{out}} = E'_o + E'_e = C'_o F(-\alpha_1) C_o L C_o F(-\alpha_4) C'_o E_{\text{in}} + C'_o F(\alpha_2) C_o L C_o F(\alpha_3) C'_o E_{\text{in}} = t_L t_C^4 t_F^2 \times \begin{bmatrix} -e_F^2 + e_F^2 e_C^4 & 0 \\ 0 & e_F^2 - e_F^2 e_C^4 \end{bmatrix} E_{\text{in}} \quad (8)$$

隔离度为

$$IS = L_0 - 20 \lg(e_F^2 - e_F^2 e_C^4) = L_0 + S_e \quad (9)$$

同样,隔离度分为两部分:一部分是由各器件的透射比引起的隔离度;另一部分为消光比引起的附加隔离度 S_e 。

图 5 为消光比与附加隔离度之间的关系图,各器件的消光比越小,隔离度越好。由于器件消光比的数值 $e \approx 10^{-5}$,产生的附加隔离度理论值 > 120 dB,因而透射比引起的隔离度可以忽略。分析可得消光比决定光环形器的隔离度性能,所以要得到高隔离度光环形器,就需要用高消光比晶体光学材料。

4.2 旋光角度误差对双通道光环形器性能参数的影响

旋光角度误差由旋光晶体制造表面平滑度、旋转角度随着温度变化而存在的变换率以及旋转角度随着不同的通信波长而产生的变换三者引起,其中后两个因素由所用的不同旋转晶体本身特性决定。

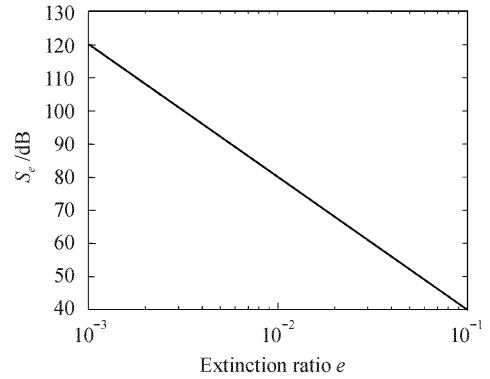


图 5 消光比对隔离度的影响关系图

Fig. 5 Calculated isolation of the proposed structure depending on the extinction ratio

假设 $e_F = 0, e_C = 0$;

4.2.1 旋光角度误差对插入损耗的影响

$$E_{\text{out}} = \frac{1}{2} t_F t_C^4 t_F^2 \begin{bmatrix} \cos \Delta \alpha_1 \cos \Delta \alpha_4 + \cos \Delta \alpha_2 \cos \Delta \alpha_3 & \cos \Delta \alpha_1 \cos \Delta \alpha_4 - \cos \Delta \alpha_2 \cos \Delta \alpha_3 \\ -\cos \Delta \alpha_1 \cos \Delta \alpha_4 + \cos \Delta \alpha_2 \cos \Delta \alpha_3 & -\cos \Delta \alpha_1 \cos \Delta \alpha_4 - \cos \Delta \alpha_2 \cos \Delta \alpha_3 \end{bmatrix} E_{\text{in}} \quad (10)$$

$$IL = -L_0 - 10 \lg \left[\frac{1}{2} (\cos^2 \Delta \alpha_2 \cos^2 \Delta \alpha_3 + \cos^2 \Delta \alpha_1 \cos^2 \Delta \alpha_4) + (\cos^2 \Delta \alpha_2 \cos^2 \Delta \alpha_3 - \cos^2 \Delta \alpha_1 \cos^2 \Delta \alpha_4) \frac{\overline{E}_x E_y + \overline{E}_y E_x}{|E_x|^2 + |E_y|^2} \right] = L_0 + L_a + \text{PDL} \quad (11)$$

旋光角度误差引起的附加插入损耗分为两部分:一部分是与偏振无关的插入损耗 L_a ;第二部分为偏振相关损耗(PDL),与输入光束的偏振状态有关。

偏振无关插入损耗

$$L_a = -10 \lg \left[\frac{1}{2} (\cos^2 \Delta \alpha_2 \cos^2 \Delta \alpha_3 + \cos^2 \Delta \alpha_1 \cos^2 \Delta \alpha_4) \right]$$

由于 $\Delta \alpha_1, \Delta \alpha_2, \Delta \alpha_3$ 和 $\Delta \alpha_4$ 约等于 0,所以它们引起的插入损耗亦很小,当旋转角度误差达到 5° 时,引起的损耗为 0.066 dB,远小于透射比引起的插入损耗,所以一般忽略掉。假设 $\cos^2 \Delta \alpha_2 \cos^2 \Delta \alpha_3$ 大于 $\cos^2 \Delta \alpha_1 \cos^2 \Delta \alpha_4$,则 L_a 介于 $-10 \lg \frac{1}{2} \cos^2 \Delta \alpha_2 \cos^2 \Delta \alpha_3$

与 $-10 \lg \frac{1}{2} \cos^2 \Delta \alpha_1 \cos^2 \Delta \alpha_4$,所以

$$\text{PDL}_{\text{max}} = L_{\text{amax}} - L_{\text{amin}} = -10 \lg(\cos^2 \Delta \alpha_2 \cos^2 \Delta \alpha_3)$$

双通道与单尾纤光环形器的偏振相关损耗理论

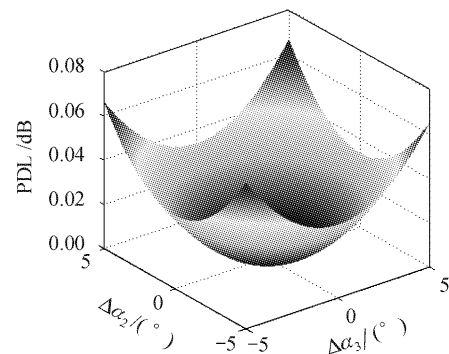


图 6 旋光角度对偏振相关损耗的影响

Fig. 6 Calculated polarization dependent loss (PDL) of the proposed structure depending on rotation angle error

结果上相同,由图 6 可以看出旋转角度误差引起的偏振相关插入损耗在角度误差允许范围内影响很小,与插入损耗总值相比,可以忽略。

4.2.2 旋光角度误差对隔离度的影响

$$E'_{\text{out}} = \frac{1}{2} t_L t_C t_F^2 \begin{bmatrix} \sin\Delta\alpha_1 \sin\Delta\alpha_4 + \sin\Delta\alpha_2 \sin\Delta\alpha_3 & \sin\Delta\alpha_1 \sin\Delta\alpha_4 - \sin\Delta\alpha_2 \sin\Delta\alpha_3 \\ -\sin\Delta\alpha_1 \sin\Delta\alpha_4 + \sin\Delta\alpha_2 \sin\Delta\alpha_3 & -\sin\Delta\alpha_1 \sin\Delta\alpha_4 - \sin\Delta\alpha_2 \sin\Delta\alpha_3 \end{bmatrix} E_{\text{in}} \quad (12)$$

$$\text{IS} = L_0 - 10\lg \frac{1}{2} \left[(\sin^2 \Delta\alpha_2 \sin^2 \Delta\alpha_3 + \sin^2 \Delta\alpha_1 \sin^2 \Delta\alpha_4) + (\sin^2 \Delta\alpha_2 \sin^2 \Delta\alpha_3 - \sin^2 \Delta\alpha_1 \sin^2 \Delta\alpha_4) \frac{\overline{E}_x E_y + \overline{E}_y E_x}{|E_x|^2 + |E_y|^2} \right] = L_0 + S_a + S_{aP} \quad (13)$$

旋光角度误差引起的隔离度值分为两部分：一部分是偏振无关 S_a ；另一部分为偏振相关 S_{aP} ，输入光束偏振状态不同，引起的隔离度值不同。

从理论分析可以得出， $S_a = S_{aP_{\text{max}}} = -10\lg(\sin^2 \Delta\alpha_x \sin^2 \Delta\alpha_y)$ ，如图 7 所示，所以旋光角度误差对隔离度的影响很大，旋光角度误差越小，隔离度性能越好。

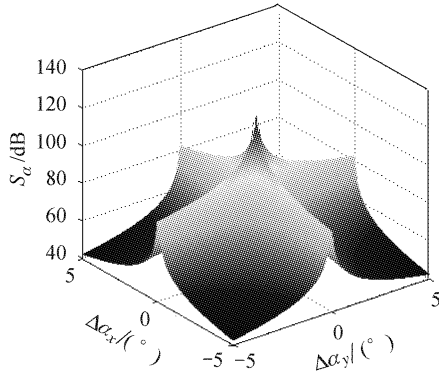


图 7 旋光角度对隔离度的影响

Fig. 7 Calculated isolation of the proposed structure depending on rotation angle error

综上所述，消光比和旋光角度误差对插入损耗的影响较小，可以忽略，影响插入损耗的主要因素是透射比，而透射比在实际设计器件中可以通过器件表面涂以增透膜等来提高，从而减小插入损耗。而对于反向隔离度，透射比的影响远小于消光比和旋光角度误差引起的，所以要提高反向隔离度，则需要提高器件消光比，消光比越小，性能越好；减小旋光角度误差，误差越小，性能越好。

5 结 论

提出了一种具有双尾纤及透镜对的新型双通道光环形器的结构设计，从理论上对本结构插入损耗和隔离度进行了分析。分析表明，透镜对的介入对

双通道光环形器插入损耗影响较小，隔离度则取决于晶体材料的旋光比和旋光角度误差。同时由于双尾纤和透镜对的引入，器件具有功能复用的作用，所以降低了制造成本和占空比。本结构中透镜对及双尾纤的应用是关键，亦可将双尾纤改成多尾纤，与透镜对结合使用，可使器件的复用功能更充分，进一步降低制造成本和占空比，推进光环形器的发展与应用。

参 考 文 献

- Xiangnong Wu, Yufeng Shen, Chao Lu *et al.*. Fiber Bragg grating-based rearrangeable nonblocking optical cross connects using multiport optical circulators [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(6):696~698
- Y. Sato, K. Aoyama. OTDR in optical transmission systems using Er-doped fiber amplifiers containing optical circulators [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(11):1001~1003
- M. Koga, T. Matsumoto. High-isolation polarization-insensitive optical circulator for advanced optical communication systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(9):1210~1217
- Takao Matsumoto. Polarisation-independent optical circulator coupled with multimode fibres [J]. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(1):8~9
- V. Delden, S. Jay. Optical circulators improve bidirectional fiber systems [J]. *Laser Focus World*, 1995, **31**(11):109~110
- J. Kim, B. Lee. Bidirectional wavelength add-drop multiplexer using multiport optical circulators and fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(5):561~563
- Z. Hakimoglu, V. Au-Yeung. Circulators help designers innovate network solutions [J]. *Laser Focus World*, 1999, **35**(2):7~12
- Huang Yonglin, Xiang Yang, Li Jie *et al.*. Homodyne crosstalk performance of optical add-drop multiplexer based on fiber gratings and circulators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4):438~440
黄勇林, 项 阳, 李 杰 等. 光纤光栅和环形器组成的光分插复用器同频串扰特性研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4):438~440
- Ruan Yinlan, Fang Luozhen, Liu Qiuhua *et al.*. High-isolation polarization-independent optical circulator [J]. *Study on Optical Communications*, 1998, (3):54~56
阮银兰, 方罗珍, 刘秋华 等. 高隔离度偏振无关光环形器[J]. *光通信研究*, 1998, (3):54~56
- Roger Lee, Steve Lin, Chien-Hsiung Chiu *et al.*. Design of optical circulators [C]. *SPIE*, 1998, **3420**:311~317