

文章编号: 0258-7025(2009)11-2928-06

# 误差自愈型高隔离度准四端口光环形器的研究与设计

苏永道 王炳霞

(济南大学理学院, 山东 济南 250022)

**摘要** 针对现有光环行器内部元件之间存在的角度误差、各种同类异构光环行器不能消除半波片光轴取向误差所导致的隔离度降低、隔离度不一致以及安装调试繁琐等弊端,提出了一种减小或消除误差的双半波片光轴非对称结构方式,设计了一种误差自愈型高隔离度准四端口光环行器,通过理论分析、琼斯矩阵运算和数学软件 MATLAB 模拟,其插入损耗可达到已有光环行器最小性能指标,而隔离度可以提高 5~8 dB。

**关键词** 光环行器; 误差自愈; 高隔离度; 光分插复用; 光交叉互联

**中图分类号** O734; TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2928

## Research and Design of Error Self-Healing High-Isolation Quasi-Four-Port Optical Circulator

Su Yongdao Wang Bingxia

(School of Science, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China)

**Abstract** The present optical circulator has a variety of defects, such as, the angle errors among constituent components, its failing to eliminate the optical axis orientation errors of half-wave plate, and its complexity in installation and debugging. In order to overcome these shortcomings, we devise a dual-wave plate axis asymmetric structure which can reduce or even eliminates errors. Further, we design an error self-healing high-isolation quasi-four-port optical circulator based on the structure. Through theoretical analysis, Jones matrix calculation and MATLAB simulation, we find its insertion loss is minimum among existing optical circulators, and the isolation can increase 5~8 dB.

**Key words** optical circulator; error self-healing; high isolation; optical add/drop modular; optical cross-connects

### 1 引 言

光环行器是一种多端口输入输出的无源非互易磁性器件,可以广泛应用于光纤通信中的光放大、波分复用、单纤双向通信、光分插复用和可编程分插复用、光纤光栅色散补偿、光交叉互联等光纤链路中<sup>[1~7]</sup>;由光环行器与光纤光栅构成光滤波器<sup>[8,9]</sup>;国外也有利用光环行器对涡轮机进行精密控制、利用光环行器构成全光逻辑模块等装置<sup>[10,11]</sup>,故光环行器有着广泛用途。

光环行器具有光信号沿规定的顺序端口正向传输导通、反向截止的特性,它的主要功能是从端口 1 输入的光信号从端口 2 输出,从端口 2 输入的光信号从端口 3 输出,从端口 3 输入的光信号从端口 4

输出,如此下去,从端口  $n-1$  输入的光信号从端口  $n$  输出,从端口  $n$  输入的光信号从端口 1 输出,形成一个环形或准环形的光路系统。由于制作工艺和使用环境的影响和限制,最常用的是三端口和四端口(或准三端口和准四端口)光环行器。

目前的光环行器在结构上可分为 3 种,一种是用分立元件组成的块状光环行器,另一种是波导型光环行器<sup>[12~14]</sup>;第三种则是结构不同于上述两种的磁光二维光子晶体光环行器<sup>[15]</sup>。由于波导型光环行器和磁光二维光子晶体光环行器远达不到实用要求,所以目前研究方向和市场上的产品多以块状光环行器为主,作者所设计的误差自愈型光环行器也属于块状结构。

收稿日期: 2009-01-21; 收到修改稿日期: 2009-02-16

作者简介: 苏永道(1954—),男,教授,主要从事光学基础理论、光纤通信理论和技术研究。E-mail: suy618@163.com

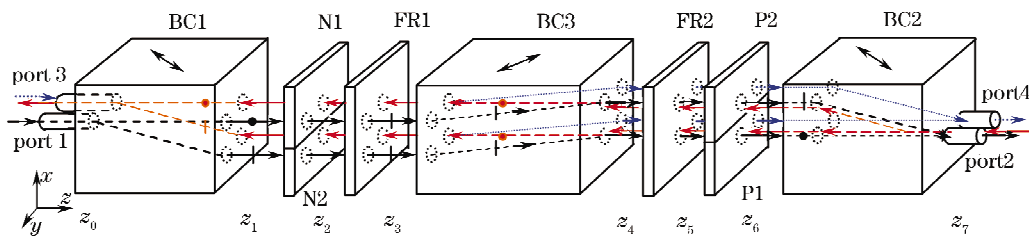


图 1 高隔离度四端口光环行器结构和光路图

Fig. 1 Structure and optical pathway diagram of high-isolation four-port optical circulator

光环行器的基本原理是利用晶体的双折射效应和磁致旋光效应,在空间上将一束任意光分成两束偏振方向相互垂直的线偏振光,以不同光路进行传输,并产生不同的偏振状态的改变,然后再利用晶体的双折射效应将它们混合在一起从输出端口输出。

## 2 高隔离度四端口光环行器的结构和工作原理

### 2.1 准四端口光环行器的结构

用天然方解石(calcite)制作偏光仪器和光环行器时,需要认真挑选光学均匀性好的晶体,而钽酸钇(YVO<sub>4</sub>)是用自有的连续(Czochralski)晶体生长法人工生长的正单轴双折射晶体<sup>[16~18]</sup>,在 0.4~5 μm 波长范围内有良好的透光性。与方解石相比,钽酸钇晶体有较高的温度稳定性、较好的物理和机械特性;而方解石由于它的易吸潮及低硬度,光学特性较差。钽酸钇不仅在光学上均匀性好(消光比高),且双折射率差比方解石大。于是用钽酸钇晶体制作光环行器,不仅可以提高光环行器的光学性能,还可以进一步缩小光环行器的体积。图 1 是采用钽酸钇单轴晶体设计的与偏振无关的高隔离度准四端口光环行器结构图。BC1,BC2 是平板型偏振分束/合束器,晶体光轴如图 1 中双箭头所示。晶体内的 o 光沿 y 轴方向振动,e 光沿 x 轴方向振动,o 光在晶体内部传输时不改变方向,e 光则往光轴方向偏折。BC3 是用钽酸钇晶体设计的光束导向器,可以使沿 x 轴方向振动的 e 光向 y 轴负向偏折,但对 o 光不产生偏折作用。光环行器的半波片光轴的取向角度误差和法拉第旋转器的旋转角度误差对插入损耗的影响很小,而对高隔离度的影响却很大<sup>[12]</sup>。大部分双半波片结构的光环行器都是采用光轴对称排列方式<sup>[13,19~21]</sup>,光轴对称排列方式从理论上可以满足高隔离度要求,每个半波片光轴取向也可以精确测量<sup>[22]</sup>,而在制作工艺和装配时却很难达到设计要求。本文给出了双半波片光轴取向非对称排列方式,如图 2 所示,N1,N2 和 P1,P2 为 4 个半波片,

N1 和 N2,P1 和 P2 分别制作一体,两个双半波片皆为光轴非对称结构排列,快轴从 y 轴算起,角度正者称为 N 型半波片,反之为 P 型半波片。非对称结构排列方式可以使线偏振光在一个传输过程中顺时针(或逆时针)旋转规定角度后,再逆时针(或顺时针)旋转规定的角度,由此可以消除装配过程半波片快轴方位取向误差——误差自愈,从而提高了光环行器的隔离度。FR1,FR2 为两片法拉第旋光晶体,二者均对 o 光和 e 光的偏振面顺时针旋转 45°。端口 1 至端口 4 处均设有自聚焦透镜,以便与光纤进行有效耦合。

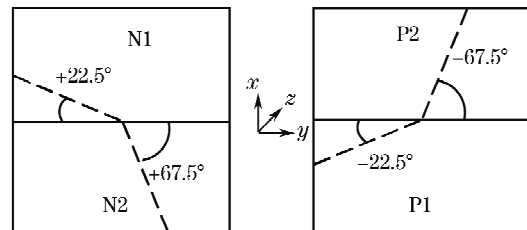


图 2 P 型和 N 型半波片快轴方向

Fig. 2 P-type and N-type half-wave plate fast axis

### 2.2 准四端口光环行器光信号的环形原理

以端口 1→2 和端口 2→3 为例分析误差自愈型高隔离度准四端口光环行器的工作原理。设定:1)半波片快轴方向如图 2 所示。2)非互易器件法拉第旋光晶体在迎着光的方向观察,光矢量始终顺时针方向旋转,即不论左行光还是右行光旋光角度均为+45°。

光信号从端口 1→2 的光路如图 1,光偏振方向如图 3 所示。从端口 1 入射的任意光(图 3 位置  $z_0$ ),通过偏振分束/合束器 BC1 分为两束相互垂直的线偏振光 o 光和 e 光(位置  $z_1$ )。o, e 光振幅矢量旋转示意图见图 4(a)和(b)。沿 y 轴偏振的 o 光通过半波片 N1 后光振幅矢量沿顺时针旋转 45°,沿 x 轴偏振的 e 光通过半波片 N2 后光振幅矢量沿逆时针旋转 45°,o 光的偏振方向成为 o', e 光的偏振方向成为 e'(位置  $z_2$ ),这两束光通过法拉第旋光晶体 FR1 后,光振幅矢量均被顺时针旋转 45°,o' 成为 o'', e' 成为 e''(位置  $z_3$ ),o'', e'' 两束光对导向晶体 BC3 而

言,皆为原 e 光的偏振方向,它们通过 BC3 后均往坐标轴的 y 轴负向偏移,从 BC3 出射后光的偏振光方向仍为  $o''$  和  $e''$  (位置  $z_4$ )。然后这两束线偏振光通过法拉第旋光晶体 FR2 皆顺时针旋转了  $45^\circ$ ,则两束线偏振光的偏振方向分别成为  $o'''$  和  $e'''$  (位置  $z_5$ )。之后分别通过半波片 P2, P1, 光振幅矢量则分别沿逆时针和顺时针旋转  $45^\circ$ , 偏振方向成为  $o''''$  和  $e''''$ 。此时,沿原 y 方向偏振的 o 光旋转到原 e 光的偏振方向,而沿原 x 方向偏振的 e 光旋转到原 o 光的偏振方向(位置  $z_6$ )。通过偏振分束/合束器 BC2 合成为一束光(位置  $z_7$ ), 于是实现了光信号从端口 1→2 与偏振无关的传输功能。

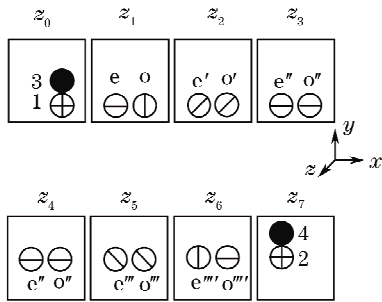


图 3 端口 1→2 光振动方向图

Fig. 3 Optical vibration in the path of port1 to port2

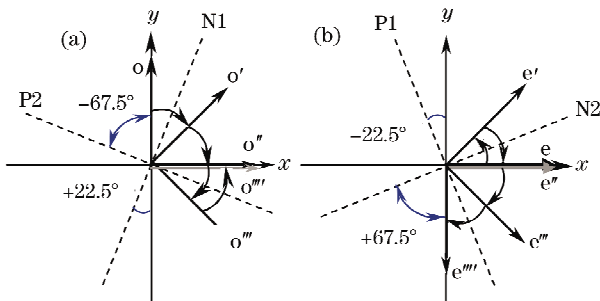


图 4 端口 1→2 时 o 光和 e 光的矢量旋转图(a)右 o 光通过 N1, P2 和 FR 传输时的矢量旋转;(b)右 e 光通过 N2, P1 和 FR 传输时的矢量旋转

Fig. 4 Vector rotation of o-ray and e-ray in the path of port1 to port2. (a) Vector rotation when right o-ray transmitting through N1, P2, and FR; (b) vector rotation when right e-ray transmitting through N2, P1, and FR

光信号从端口 2→3 的光路如图 1, 光偏振方向如图 5 所示。从端口 2 入射的任意光(图 5 位置  $z_7$ ), 通过偏振分束/合束器 BC2 分成两束相互垂直的线偏振光 o 光和 e 光(位置  $z_6$ )。o 光和 e 光振幅矢量旋转示意图见图 6(a) 和 (b), 沿 y 轴偏振的 o 光通过半波片 P1 后光振幅矢量逆时针旋转  $45^\circ$ , 沿 x 轴偏振的 e 光通过半波片 P2 后光振幅矢量顺时

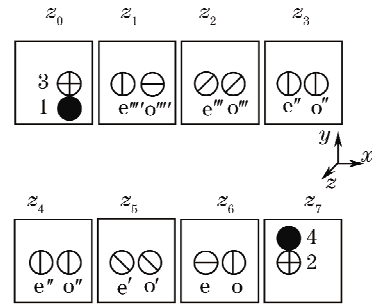


图 5 端口 2→3 时光振动方向图

Fig. 5 Optical vibration in the path of port 2 to port3

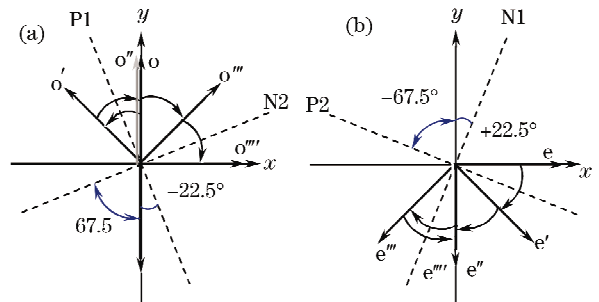


图 6 端口 2→3 时 o 光和 e 光的矢量旋转图(a)左 o 光通过 P1, N2 和 FR 传输时的矢量旋转;(b)左 e 光通过 P2, N1 和 FR 传输时的矢量旋转

Fig. 6 Vector rotation of o-ray and e-ray in the path of port 2 to port3. (a) Vector rotation when left o-ray transmitting through P1, N2 and FR; (b) vector rotation when left e-ray transmitting through P2, N1 and FR

针旋转  $45^\circ$ , o 光的偏振方向成为  $o'$ , e 光的偏振方向成为  $e'$  (位置  $z_5$ ), 这两束线偏振光通过法拉第旋光晶体 FR2 后, 光振幅矢量均按顺时针旋转了  $45^\circ$ ,  $o'$  成为  $o''$ ,  $e'$  成为  $e''$  (位置  $z_4$ ),  $o''$ ,  $e''$  光对导向晶体 BC3 而言, 均为原 o 光的偏振方向, 它们通过导向晶体 BC3 后皆不发生偏移(位置  $z_3$ ), 然后这两束线偏振光通过法拉第旋光晶体 FR1 都顺时针旋转了  $45^\circ$ , 此时两束光的偏振方向为  $o'''$  和  $e'''$  (位置  $z_2$ )。之后分别通过半波片 N2, N1, 则光振幅矢量分别沿顺时针和逆时针旋转  $45^\circ$ , 偏振方向成为  $o''''$  和  $e''''$ 。此时, 沿原 y 方向偏振的 o 光旋转到原 e 光的偏振方向, 而沿原 x 方向偏振的 e 光旋转到原 o 光的偏振方向(位置  $z_1$ )。通过偏振分束/合束器 BC1 合成为一束光(位置  $z_0$ ), 于是实现了光信号从端口 2→3 与偏振无关的传输功能。准四端口光环行器的端口 3→4 传输过程与上述分析相同, 在此不再赘述。

### 2.3 光环行器误差自愈原理

以半波片光轴装配取向误差为例进行误差消除分析。在图 7 中, 虚线位置是半波片 P1 和 N2 的光

轴设计位置,实线为偏离位置,设两半波片光轴垂直,假如装配调试时,它们的光轴取向角度误差皆为 $\pm\Delta\theta$ ,在此取偏离设计位置 $-\Delta\theta$ ,即 P1 的 $\theta < 22.5^\circ$ ,N2 的 $\theta > |67.5^\circ|$ 。沿  $y$  轴方向振动的  $o$  光经 P1 后的光矢量为  $o'$ , $o'$  距设计位置的角度误差成为 $-2\Delta\theta$ ,若两法拉第旋转器 FR1,FR2 的旋转角度皆为设计值  $45^\circ$ , $o'$  光经第 FR1 后出射光矢量为  $o''$ , $o''$  光偏离设计位置( $x$  轴)仍为 $-2\Delta\theta$ , $o''$  再 FR2 后的光矢量为  $o'''$ , $o'''$  偏离设计位置也是一 $2\Delta\theta$ ,则  $o'''$  通过半波片 N2 后旋转到设计位置( $x$  轴),从而消除了半波片装配光轴取向误差。同理,当半波片光轴装配调试时偏离设计位置 $+\Delta\theta$ 时, $o'''$  也会旋转到设计位置( $x$  轴)而消除光轴取向误差,从而达到误差自愈的目的。

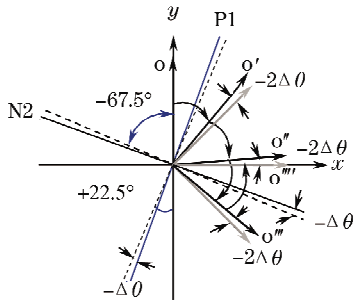


图7 角度误差消除原理图

Fig. 7 Mechanism in elimination of angle errors

### 3 准四端口光环形器的插入损耗和隔离度

BC1,BC2 分束/合束器的  $o, e$  光琼斯矩阵可表述为<sup>[20]</sup>

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

端口 2→3 传输时,导向晶体的琼斯矩阵为

$$C'_o = C'_e = C_o = t_c \begin{bmatrix} e_c & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

端口 3→2 传输时,导向晶体的琼斯矩阵为

$$C'_o = C'_e = C_e = t_c \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e_c \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $t_c$  和  $e_c$  分别为 BP1, PB2, BC 分束棱镜和导向棱镜的透射率与消光比。

光轴取向不同的半波片 P1, P2, N1, N2 的琼斯矩阵分别为

$$W(N_1) = W(P_2) = t_w \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & ie_w \\ -ie_w & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$W(P_1) = W(N_2) = t_w \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & ie_w \\ -ie_w & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $t_w, e_w$  分别为半波片的透射率和消光比。

法拉第旋光晶体 FR1, FR2 的琼斯矩阵均为

$$F = t_f \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & ie_f \\ -ie_f & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中  $t_f, e_f$  分别为法拉第旋光晶体的透射率和消光比。

入射光的琼斯矩阵为

$$E_{in} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $E_x, E_y$  是入射光在直角坐标系  $x, y$  轴的振幅分量。

#### 3.1 插入损耗的计算

以端口 2→3 为例计算插入损耗。由图 1 可知,端口 2→3 传输时, $C'_o = C_o, C'_e = C_e$ 。在端口 3 输出的光振幅是输出光的  $o, e$  光振幅之和,即为

$$\begin{aligned} E_{out} = E_{o,out} + E_{e,out} = & C_e W(N_2) F C'_o F W(P_1) C_o E_{in} + \\ & C_o W(N_1) F C'_e F W(P_2) C_e E_{in} = \\ & C_e W(N_2) F C_o F W(P_1) C_o E_{in} + \\ & C_o W(N_1) F C_e F W(P_2) C_e E_{in}. \end{aligned}$$

将对应琼斯矩阵代入上式得

$$E_{out} = E_{o,out} + E_{e,out} = t_c^2 t_w^2 t_f^2 \begin{bmatrix} -2iAE_x & -BE_y \\ BE_x & -2iAE_y \end{bmatrix},$$

式中  $A = e_c^2 e_f + e_c e_f - e_c e_w^2 e_f - e_c^2 e_w^2 e_f, B = 1 + e_c^2 + e_c^2 e_f^2 + e_c e_f^2 - e_c^2 e_w^2 e_f^2 - e_c^2 e_w^2 - e_c e_w^2 - e_c^2 e_f^2$ 。由  $P_{out} = E_{out}^* E_{out}$  得端口 3 的输出光功率为

$$P_{out} = t_c^6 t_w^4 t_f^4 (4A^2 + B^2) P_{in}.$$

根据损耗定义可得端口 2→3 插入损耗为

$$\begin{aligned} IL = -10 \lg P_{out} / P_{in} = & -10 \lg [t_c^6 t_w^4 t_f^4 (4A^2 + B^2)] = \\ & -60 \lg t_c - 40 \lg t_w - 40 \lg t_f - \\ & 10 \lg (4A^2 + B^2) = L + L_e, \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $L_e = -10 \lg (4A^2 + B^2)$ , 因为偏振分束/合束器、法拉第旋转器和导向晶体的消光比均小于  $10^{-5}$  (光学均匀的晶体消光比可达到  $10^{-7}$ ), 所以  $L_e \approx -10 \lg 1 = 0$ , 即消光比引起的附加损耗近似为零。因此,插入损耗为

$$IL = -60 \lg t_c - 40 \lg t_w - 40 \lg t_f, \quad (9)$$

在每个器件光学表面镀增透膜后,并采用无胶组装,可使插入损耗小于 0.7 dB。

### 3.2 隔离度的计算

以端口 2→1 为例计算隔离度,由图 1 可知,端口 2→1 传输时,  $C'_c = C_e, C'_e = C_c$ 。在端口 1 输出振幅为输出的 o, e 光振幅之和,即为

$$\begin{aligned} E'_{out} &= E'_{o,out} + E'_{e,out} = \\ & C_e W(N_2) FC'_o FW(P_1) C_o E_{in} + \\ & C_o W(N_1) FC'_e FW(P_2) C_e E_{in} = \\ & C_e W(N_2) FC_e FW(P_1) C_o E_{in} + \\ & C_o W(N_1) FC_e FW(P_2) C_e E_{in}. \end{aligned}$$

将对应琼斯矩阵代入 o, e 光的输出表达式得

$$E'_{out} = E'_{o,out} + E'_{e,out} = t_c^2 t_w^2 t_f^2 \begin{bmatrix} -2iA'E_x & -B'E_y \\ B'E_x & -2iA'E_y \end{bmatrix}$$

式中  $A' = e_c^2 e_f + e_c e_f - e_c e_w^2 e_f - e_c^2 e_w^2 e_f, B' = e_c^2 e_f^2 + e_c^2 + e_c + e_f - e_c^3 e_w - e_c^2 e_w^2 e_f^2 - e_c e_w^2 e_f^2 - e_w^2$ 。由  $P'_{out} = E'^*_{out} E'_{out}$  得

$$P'_{out} = t_c^6 t_w^4 t_f^4 (4A'^2 + B'^2) P_{in}.$$

根据隔离度定义可得端口 2→1 的隔离度为

$$\begin{aligned} IS &= -10\lg(P'_{out}/P_{in}) = \\ & -10\lg[t_c^6 t_w^4 t_f^4 (B'^2 + 4A'^2)] = \\ & -60\lg t_c - 40\lg t_w - 40\lg t_f - \\ & 10\lg(B'^2 + 4A'^2) = L + I_e, \end{aligned} \tag{10}$$

式中  $I_e = -10\lg(4A'^2 + B'^2)$ ,因各个器件的消光比均小于  $10^{-5}$ ,所以  $I_e \gg L$ 。因此,隔离度为

$$IS = -10\lg(P'_{out}/P_{in}) \approx I_e, \tag{11}$$

由(11)式可知,隔离度与消光比有关,且消光比越小,隔离度就越高,假如消光比  $e_c = e_f = e$ ,用 MATLAB 数学软件绘出隔离度和消光比的关系如图 8 所示,消光比在  $e=10^{-5}$  时,隔离度  $L_e > 60$  dB,双波片光轴非对称结构排列的光环行器,其隔离度比常规光环行器提高 5~8 dB。且降低了对半波片光轴取向的严格要求。

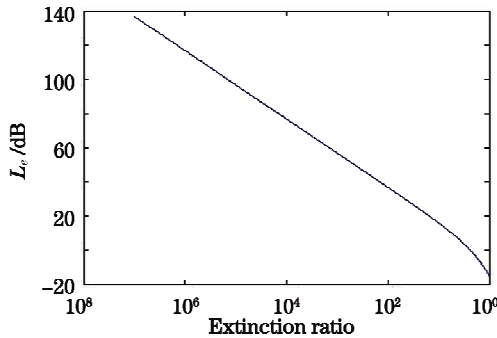


图 8 隔离度与消光比的关系

Fig. 8 Relationship between isolation and extinction ratio

### 3.3 装配测试

按设计图纸,采用无胶装配,且双半波片光轴按设计位置和人为造成偏离设计位置( $\leq \pm 5^\circ$ )放置。用 AV-38124A 高稳定度激光光源(波长  $\lambda=1550$  nm),AV2498A 光功率计及光纤跳线进行隔离度、插入损耗、回波损耗等参数测试,经多次拆装实验,测试值均符合设计要求。以隔离度测试为例,从端口 2 输入大于 0 dB 光信号功率,在端口 1 测隔离度的大小(端口 3 可测插入损耗)。在此给出前 10 次隔离度与装配次数的关系曲线,如图 9 所示。由曲线可知,平均隔离度约在 66.5 dB,无论双半波片光轴在设计位置还是偏离设计位置,其隔离度在平均值附近约有小于 0.5 dB 的波动,这一波动值或许是因为其他装配误差不一致所导致的。实验说明,双半波片光轴非对称结构,确实能起到减小或消除半波片光轴误差导致光环行器隔离度离散性大的弊端。

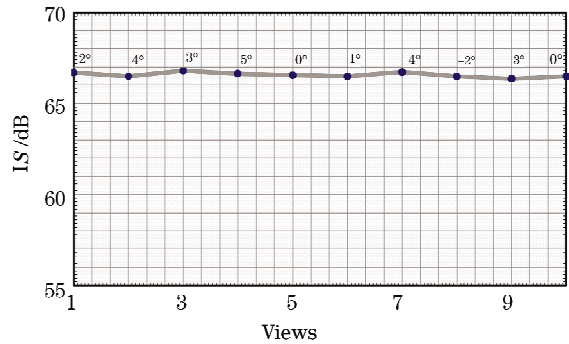


图 9 隔离度与装配次数实验关系曲线

Fig. 9 Curve of experimental relation between isolation and the number of assembly

## 4 结 论

通过对现有双半波片光轴对称结构排列的光环行器研究和分析,提出并设计了双半波片光轴非对称式结构排列的光环行器。除了用图示直观地给出了半波片光轴装配取向误差自愈的解释以外,还通过琼斯矩阵分析了插入损耗和隔离度。该设计方案节省了光环行器装配和调试时间,为今后开发研制性能更加优异的光环行起到一定的借鉴作用。值得一提的是,该设计方案还不能减小或消除法拉第旋转器的角度误差。

### 参 考 文 献

- 1 S. W. Harun, H. Ahmad. Demonstration of highly efficient flat-gain L-band EDFA with two-stage double-pass configuration[J]. *ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications*, 2004, 2(1): 32~39
- 2 Sarun Sumriddetchkajorn. Thin-film filter improves performance

- with angle-multiplexed architecture[C]. *SPIE*, 2006, **10**: 1~2
- 3 Lu Hongbin. A new single wavelength and single fiber Bi-directional transmission converter and its performance test [J]. *Designing Techniques of Posts and Elecommun.*, 2007, **7**: 16~18  
卢洪斌. 一种新型单波长单纤双向传输转换器及其性能测试[J]. 邮电设计技术, 2007, **7**: 16~18
- 4 Yoji Makiuchi, Hiroshi Matsuura. Development of a low-loss optical circulator[J]. *Furukawa Review*, 2002, **22**: 1~4
- 5 Li Pei, Tigang Ning, Wei Jian *et al.*. Study on the 4×10 Gb/s, 400 km dispersion compensation by chirped optical fiber grating [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(1): 9~11
- 6 Lu Dan, Cao Jihong, Qin Xi *et al.*. Multicast support all-optical OXC research and implementation[J]. *Opt. Commun. Technol.*, 2007, (8): 11~14  
卢丹, 曹继红, 秦曦等. 支持全光组播 OXC 的研究与实现[J]. 光通信技术, 2007, (8): 11~14
- 7 Lilin Yi, Yves Jaouen, Weisheng Iiu *et al.*. Improved slow-light performance of 10 Gb/s NRZ, PSBT and DPSK signals in fiber broadband SBS[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 1672~1679
- 8 Yuanyuan Lu, Cishuo Yan, Qingjiang Chang *et al.*. An all-optical metro-access interface for a PON system based on NRZ to FSK format conversion [C]. *OFC/NFOEC*, 2008, OW117
- 9 Tan Zhongwei, Li Bin, Wang Yanhua *et al.*. Background loss of the fiber induced by the ultraviolet light exposure[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 239~242  
谭中伟, 李彬, 王燕花等. 光纤的紫外曝光引起的背景损耗[J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 239~242
- 10 Andreas Kempe, Stefan Schlamp, Thomas Rösger *et al.*. Spatial and temporal high-resolution optical tip-clearance probe for harsh environments[C]. *13th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon, Portugal*, 2006. 1~8
- 11 Qianfan Xu, Michal Lipson. All-optical logic based on silicon micro-ring[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(3): 924~929
- 12 Tian Yanning, Fang Qiang, Wang Yongchang. Structure and characteristics of a double function optical circulator with double fiber tip and lens twice[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1398~1402  
田燕宁, 方强, 王永昌. 双通道光环形器结构的设计及理论分析[J]. 中国激光, 2004, **31**(11): 1398~1402
- 13 Lu Rong. Study on the structure of reflecting optical circulator [J]. *J. Xian University of Post and Telecommunications*, 2006, **11**(5): 56~59  
陆蓉. 反射式光环形器的结构类型研究[J]. 西安邮电学院学报, 2006, **11**(5): 56~59
- 14 T. Mizumoto, H. Chihara, N. Tokui *et al.*. Verification of waveguide-type optical circulator operation[EB/OL]. [2009-01-16]. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel/2220/2702/00082552.pdf?temp=x>
- 15 Zheng Wang, Shanhui Fan. Optical circulators in two-dimensional magneto-optical photonic crystals[J]. *Opt. Express*, 2005, **30**(15): 1989~1991
- 16 Zhuang Xinxin, Su Genbo, He Youping *et al.*. The properties of birefringence crystals used in optical isolator [J]. *Chinese J. Structural Chemistry*, 2001, **20**(4): 291~293  
庄欣欣, 苏根博, 贺友平等. 双折射晶体—重要的光功能材料[J]. 结构化学, 2001, **20**(4): 291~293
- 17 Huang Hezhen, Li Huishi. YVO<sub>4</sub> crystal and its applications in fiber optic communications[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(2): 212~215  
黄河振, 李会士. 钒酸钇晶体及其在光纤通信中的应用[J]. 光电子 • 激光, 2002, **13**(2): 212~215
- 18 Li Gansheng, Wu Xiliang, Wei Min *et al.*. Growth of large-size and high-quality YVO<sub>4</sub>-birefringent crystals [J]. *J. Synthetic Crystals*, 1999, **28**(1): 27~30  
李敢生, 吴喜良, 位民等. 大尺寸优质钒酸钇 (YVO<sub>4</sub>) 双折射晶体生长[J]. 人工晶体学报, 1999, **28**(1): 27~30
- 19 Tian Yanning, Fang Qiang, Wang Yongchang. Double-channel optical circulator with two-fiber tips[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(12): 1389~1393  
田燕宁, 方强, 王永昌. 多功能光环形器结构与特性分析[J]. 光电子 • 激光, 2004, **15**(12): 1389~1393
- 20 Ruan Yinlan, Fang Luozhen, Liu Qiuhua *et al.*. High-isolativity polarization-independent optical circulator[J]. *Study on Optical Commun.*, 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
- 21 Tian Yanning, Fang Qiang, Wang Yongchang. Structure and characteristics of double-channel reflecting optical circulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, **27**(1): 23~27  
田燕宁, 方强, 王永昌. 双通道三端口反射式光环形器结构与特性分析[J]. 应用光学, 2006, **27**(1): 23~27
- 22 Ren Hongliang, Wang Jiuyang, Lou Liren *et al.*. Measuring phase retardation and fast axis azimuth of a wave plate using Michelson interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 249~253  
任洪亮, 王久扬, 楼立人等. 利用迈克耳孙干涉仪测量波片相位延迟量和快轴方向[J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 249~253