

文章编号: 0258-7025(2002)11-0995-05

在线式双级光隔离器的隔离度分析

万助军, 曹明翠, 季杭峰

屈红昌

(华中科技大学激光技术与工程研究院, 湖北 武汉 430074) (康顺光通讯有限公司, 福建 福州 350014)

提要 采用等效琼斯矩阵方法, 分析了制约在线式双级光隔离器隔离度的各种因素, 提出了对两级采用不同角度的楔角片来制作双级隔离器的方案, 并实现批量生产。根据理论分析, 隔离度可以达到 58 dB 以上, 量产结果表明, 80% 的产品隔离度达到 58 dB 以上, 而平均隔离度为 61 dB。

关键词 光隔离器, 法拉第旋光晶体, 楔角片, 隔离度, 消光比

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Isolation Analysis of In-line Dual Stage Optical Isolator

WAN Zhu-jun¹, CAO Ming-cui¹, JI Hang-feng¹, QU Hong-chang²

(¹Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan, Hubei 430074)
(²Koncent Communication Inc., Fuzhou, Fujian 350014)

Abstract The factors that restrict the isolation of an in-line dual stage optical isolator are analyzed using equivalent Jones matrix. A new project for dual stage optical isolator is reported, which uses wedges of different angle for each stage. According to theoretical analysis, the isolation will be more than 58 dB. The result of volume production shows that the isolation of 80% products is more than 58 dB and the average isolation is 61 dB. So, this project can increase the isolation of a dual stage optical isolator largely.

Key words optical isolator, Farady rotator, wedge, isolation, extinction ratio

光隔离器是一种非互易传输光无源器件, 用来消除或抑制光纤信道中产生的反向光。光隔离器按结构可分为块状型和波导型, 块状型目前已经大量商用化, 而波导型尚处于实验研究阶段^[1]; 块状型光隔离器可以分为偏振相关型^[2~7]和偏振无关型, 其中偏振无关型又可以分为 Walk-off 型^[8,9]和 Wedge 型^[10~12]。偏振相关型光隔离器一般两端不接光纤, 与 DFB-LD 激光器封装在一起, 通过尾纤输出, 因而也叫自由空间型; 偏振无关型光隔离器一般通过两端的光纤接入光纤线路, 因而也叫在线型。偏振无关型中, Walk-off 型所需晶体体积大, 成本高, 已经很少使用, 现在商用的多为 Wedge 型。

大容量高速率的 DWDM 光纤通信系统, 对光隔离器的隔离度(ISO)和带宽要求越来越高。各厂家的产品目录显示, 普通的单级光隔离器, 由于受元

件消光比和波长相关性制约, 峰值隔离度只能达到 42 dB 以上, 在 $\lambda_0 \pm 15$ nm 的带宽内, 其隔离度只能达到 32 dB 以上。这已经不能满足需求, 因此人们开始研究双级光隔离器, 以获得更高的隔离度和带宽^[13~15]。

本文借鉴前人的分析方法, 针对在线式双级光隔离器, 采用等效琼斯矩阵法, 分析各种影响因素, 找到了在实际生产中制约其隔离度的主要原因, 并提出了一种提高隔离度的有效方案。

1 隔离器结构设计

双级隔离器结构如图 1 所示, 双折射晶体楔角片和法拉第旋光晶体如图 1(a) 排列在一个平面支架上并塞入磁环中, 两端与准直器耦合并通过一个

收稿日期: 2001-09-12; 收到修改稿日期: 2001-12-10

作者简介: 万助军(1978—)男, 江西人, 华中科技大学激光技术与工程研究院硕士研究生, 主要从事光纤通信器件的研究。E-mail: wanzhujun@263.net

金属件焊接封装在一起。不同于文献 13~15 所用方案的是,我们对第一级楔角片 P_{11} , P_{12} 和第二级楔角片 P_{21} , P_{22} 分别采用不同楔角。正向光分两束以偏振态 $o-o-e-e$ 和 $e-e-o-o$ 通过光路之后,除了发生一些横向偏移,方向不变,耦合到输出准直器中;反向光分两束以偏振态 $o-e-o-e$ 和 $e-o-e-o$ 通过光路,相当于通过两个串联的渥拉斯顿棱镜,偏离原光路因

此不能够耦合到输入准直器中,从而达到隔离效果。

楔角片 P_{11} 和 P_{12} 尺寸为(薄端厚度×高度×宽度(楔角)) $0.25\text{ mm} \times 1.22\text{ mm} \times 1.00\text{ mm}(5^\circ)$,楔角片 P_{21} 和 P_{22} 尺寸为 $0.23\text{ mm} \times 1.22\text{ mm} \times 1.00\text{ mm}(7^\circ)$;各楔角片光轴方向如图 1(b)所示。考虑采用了不同楔角,两级楔角片薄端厚度也不同,以使两级的偏振模色散相互补偿。

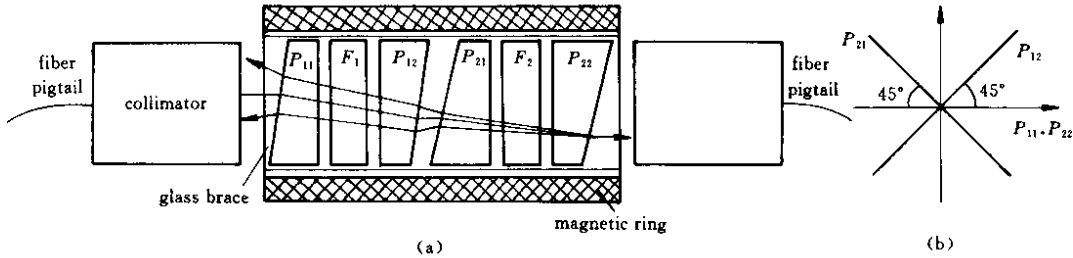


图 1 双级隔离器结构 (a) 装配图 (b) 光轴方向
Fig. 1 Structure of the dual stage optical isolator (a) assembling diagram ;(b) direction of optical axis

2 隔离度的等效琼斯矩阵法分析

在线式光隔离器中双折射晶体楔角片的功能类似于偏振片,可以用以下等效琼斯矩阵来描述光在楔角片和法拉第旋光晶体中的传输特性^[7,10,11,15]

$$P = \begin{bmatrix} \cos^2(\varphi) & \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi) & \sin^2(\varphi) \end{bmatrix} + e_p \begin{bmatrix} \sin^2(\varphi) & -\sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi) \\ -\sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi) & \cos^2(\varphi) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$F = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} + e_f \begin{bmatrix} \sin(\theta) & \cos(\theta) \\ -\cos(\theta) & \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, φ 为楔角片透光轴(晶体光轴或其正交方向,对应 o 光或 e 光偏振方向)与 x 轴的夹角, θ 为法拉第旋光晶体对光矢量的旋转角(逆时针为正)。对于我们所用的旋转片,旋转角为 45° ,其传输矩阵为

$$F = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{e_f}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

影响该类双级光隔离器隔离度的因素有:法拉第旋光晶体的消光比 $E_f = e_f^2$, 旋转角误差(对光的偏振方向并不是准确旋转 45°)和波长相关性;楔角片的消光比 $E_p = e_p^2$ (定义为沿着 o 光轨迹传播的 e 光,

或者反之),光轴加工和装配误差(主要是各楔角片的光轴相对于理想方向的偏离,以 P_{22} 的光轴为参考, P_{11} , P_{12} 和 P_{21} 的光轴分别偏离理想方向 Δ_{11} , Δ_{12} 和 Δ_{21});元件表面剩余反射等。因为以上因素,使得反向光回到输入光纤中,造成隔离度下降。

反向光入射到楔角片 P_{22} 上,被分成两束光传播,不失一般性,取其中一束进行分析,并假设其偏振方向与 x 轴平行,琼斯矩阵为

$$J_{in} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

目前增透膜的剩余反射率可达 $R < 0.25\%$,因此可忽略元件表面剩余反射对隔离度的影响。综合考虑各元件消光比和楔角片光轴误差(旋光晶体角度误差与楔角片光轴加工和装配误差是等效的,可并入考虑)的影响,发现反向光可以经历三种偏振态变化过程回到输入光纤中,对不同情况,采用不同透光方向的偏振片琼斯矩阵来等效各楔角片的传输特性(光轴方向或者其正交方向)。对于单级隔离器,只有一种情况($o-o$ 和 $e-e$),文献[10]中对 o 光和 e 光给出的不同传输矩阵,当属此一种情况。

2.1 偏振态变化过程为 $o-o-e-e$ 和 $e-e-o-o$

取 $o-o-e-e$ 这路光进行分析,如图 2(a)所示,得到各楔角片的等效琼斯矩阵为

$$P_{11e} = \begin{bmatrix} \Delta_{11}^2 & -\Delta_{11} \\ -\Delta_{11} & 1 \end{bmatrix} + e_p \begin{bmatrix} 1 & \Delta_{11} \\ \Delta_{11} & \Delta_{11}^2 \end{bmatrix} \quad P_{12e} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + 2\Delta_{12} & -1 \\ -1 & 1 - 2\Delta_{12} \end{bmatrix} + \frac{e_p}{2} \begin{bmatrix} 1 - 2\Delta_{12} & 1 \\ 1 & 1 + 2\Delta_{12} \end{bmatrix}$$

$$P_{22o} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + e_p \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_{21o} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + 2\Delta_{21} & -1 \\ -1 & 1 - 2\Delta_{21} \end{bmatrix} + \frac{e_p}{2} \begin{bmatrix} 1 - 2\Delta_{21} & 1 \\ 1 & 1 + 2\Delta_{21} \end{bmatrix}$$

因为 $\Delta_{11}, \Delta_{12}, \Delta_{21}$ 一般很小, 以上采用了近似式 $\sin(\Delta) \approx \Delta, \cos(\Delta) \approx 1$ 。从正向输出光的琼斯矩阵和光强分别为

$$J_{out1} = P_{11e} \cdot F \cdot P_{12e} \cdot P_{21o} \cdot F \cdot P_{22o} \cdot J_{in}$$

$$I_{out1} = |J_{out1}|^2$$

楔角片和旋光晶体的消光比约为 45 dB, 即 E_p , $E_f \approx 10^{-4.5}$, 在此称为一阶小量; 一般 Δ_{11}, Δ_{12} 和 $\Delta_{21} < 1^\circ$, 那么以弧度记 $\Delta_{11}^2, \Delta_{12}^2, \Delta_{21}^2 < 10^{-3.5}$, 亦可视为一阶小量。在矩阵相乘过程中, 不断略去所产生的三阶以上小量, 但并不把各列向量合并, 这是因

为各列向量分别表示一束线偏振光(空间重叠而相位不同), 把各项合并即为考虑各束光的偏振干涉, 但是在处理过程中并没有考虑各束光的相位关系, 不能简单相加, 因此分别求出光强再相加, 得到

$$I_{out1} = E_p^2 + E_f^2 + E_p \cdot E_f + E_p \cdot \Delta_{21}^2 + E_f \cdot (\Delta_{12} - \Delta_{11})^2 + E_f \cdot \Delta_{21}^2 + \Delta_{21}^2 \cdot (\Delta_{12} - \Delta_{11})^2$$

2.2 偏振态变化过程为 o-e-e-o 和 e-o-o-e

取 o-e-e-o 这路光进行分析, 如图 2(b) 所示, 得到各楔角片的等效琼斯矩阵为

$$P_{11o} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta_{11} \\ \Delta_{11} & \Delta_{11}^2 \end{bmatrix} + e_p \begin{bmatrix} \Delta_{11}^2 & -\Delta_{11} \\ -\Delta_{11} & 1 \end{bmatrix} \quad P_{12e} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + 2\Delta_{12} & -1 \\ -1 & 1 - 2\Delta_{12} \end{bmatrix} + \frac{e_p}{2} \begin{bmatrix} 1 - 2\Delta_{12} & 1 \\ 1 & 1 + 2\Delta_{12} \end{bmatrix}$$

$$P_{22o} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + e_p \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad P_{21e} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 - 2\Delta_{21} & 1 \\ 1 & 1 + 2\Delta_{21} \end{bmatrix} + \frac{e_p}{2} \begin{bmatrix} 1 + 2\Delta_{21} & -1 \\ -1 & 1 - 2\Delta_{21} \end{bmatrix}$$

$$J_{out2} = P_{11o} \cdot F \cdot P_{12e} \cdot P_{21e} \cdot F \cdot P_{22o} \cdot J_{in}$$

$$I_{out2} = |J_{out2}|^2 = E_p^2 + 2E_p \cdot E_f + E_p \cdot \Delta_{21}^2 + E_p \cdot \Delta_{11}^2 + (\Delta_{21} - \Delta_{12})^2$$

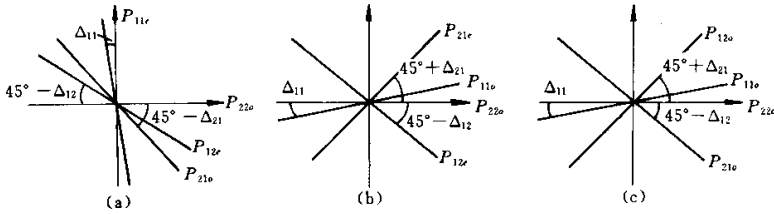


图 2 晶体楔角片的等效偏振方向(对应不同偏振态的反向光)

Fig.2 Equivalent polarization direction of crystal wedges

(corresponding to backward light with different state of polarization)

2.3 偏振态变化过程为 o-o-o-o 和 e-e-e-e

取 o-o-o-o 这路光进行分析, 如图 2(c) 所示, 得到各楔角片的等效琼斯矩阵为

$$P_{11o} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta_{11} \\ \Delta_{11} & \Delta_{11}^2 \end{bmatrix} + e_p \begin{bmatrix} \Delta_{11}^2 & -\Delta_{11} \\ -\Delta_{11} & 1 \end{bmatrix} \quad P_{12o} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 - 2\Delta_{12} & 1 \\ 1 & 1 + 2\Delta_{12} \end{bmatrix} + \frac{e_p}{2} \begin{bmatrix} 1 + 2\Delta_{12} & -1 \\ -1 & 1 - 2\Delta_{12} \end{bmatrix}$$

$$P_{22o} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + e_p \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad P_{21o} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + 2\Delta_{21} & -1 \\ -1 & 1 - 2\Delta_{21} \end{bmatrix} + \frac{e_p}{2} \begin{bmatrix} 1 - 2\Delta_{21} & 1 \\ 1 & 1 + 2\Delta_{21} \end{bmatrix}$$

$$J_{out3} = P_{11o} \cdot F \cdot P_{12o} \cdot P_{21o} \cdot F \cdot P_{22o} \cdot J_{in}$$

$$I_{out3} = |J_{out3}|^2 = E_p^2 + 2E_p \cdot E_f + E_p \cdot \Delta_{21}^2 + E_p \cdot \Delta_{11}^2$$

这样, 如果从反向入射的光强为 1, 那么回到输入光纤中的光强和隔离度分别为

$$\Delta_1^2 \cdot \Delta_2^3 + \Delta_2^2 \quad (5)$$

$$ISO = -10 \cdot \lg(I_{out}) \quad (6)$$

$$I_{out} = I_{out1} + I_{out2} + I_{out3} =$$

$$3E_p^2 + E_f^2 + 5E_p \cdot E_f + 3E_p \cdot \Delta_3^2 +$$

$$2E_p \cdot \Delta_1^2 + E_f \cdot \Delta_3^2 + E_f \cdot \Delta_1^2 +$$

$$\text{其中, } \begin{cases} \Delta_1 = \Delta_{12} - \Delta_{11} \\ \Delta_2 = \Delta_{21} - \Delta_{12} \\ \Delta_3 = \Delta_{21} \end{cases}$$

分别为 P_{11} 与 P_{12} , P_{21} 与 P_{12} , P_{22} 与 P_{21} 的光轴夹角相对于理想情况 (即 45° 90° 45°) 的偏离量。

注意到在 I_{out} 的各项中,由于楔角片和旋光晶体消光比引入的量均为二阶小量,可以忽略; $\Delta_1^2 \Delta_3^2$ 项亦为二阶小量,但较其他二阶小量大 $1 \sim 2$ 个数量级;只有 Δ_2^2 项为一阶小量。因此,在制约双级光隔离器隔离度的各种因素中,加工和装配误差是最主要的,其他因素可以忽略。图 3 所示为隔离度与加工和装配误差的关系,从图中可以看出,只有当 $\Delta_2 < 0.1^\circ$ 时,才能使 $ISO > 55$ dB,而我们的光轴定向技术和装配工艺是很难保证这一点的。相对来说,对 Δ_1 和 Δ_3 的要求宽松得多了,当 $\Delta_1 = \Delta_3 = 2^\circ$ 时,仍然有 $ISO > 58$ dB,这在工艺上是可以保证的。

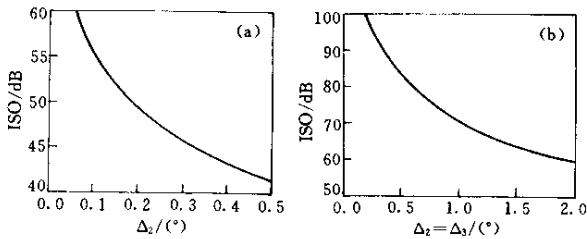


图 3 隔离度与装配误差的关系

Fig. 3 Relation between isolation and assembly error

3 解决方法

根据以上分析,知道加工和装配误差 Δ_2 对于隔离度的影响最大。从直观上解释,这是因为反向入射的光首先经过第二级,被偏离入射方向一个角度 θ ;但是,当它进入第一级时,由于存在装配误差 Δ_2 ,有一部分光(假如入射光功率为 1,则该部分光功率为 $\sin^2(\Delta_2) \approx \Delta_2^2$)未发生 o 光与 e 光的倒换,在各楔角片中的偏振态变化过程为 $o-e-e-o$ 和 $e-o-o-e$,而不是 $o-e-o-e$ 和 $e-o-e-o$,相当于通过了两个反装的渥拉斯顿棱镜,从第一级出射时,将偏回原光路,从而耦合到输入光纤中,影响隔离度,如图 4(a) 所示。

解决这个问题的办法是,对隔离器的前后两级分别采用不同角度的楔角片,如图 1(a) 所示。这样,第二级先把光偏离 θ_2 角度,其中功率为 Δ_2^2 的光将被第一级偏回 θ_1 角度;由于 $\theta_1 \neq \theta_2$,这部分光还是不能回到原光路中,如图 4(b) 所示;在耦合到输入光纤中时,由于失配角 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ 带来额外损耗,相当于对这部分光增加了一道关卡。其总隔离度为 [11, 16]

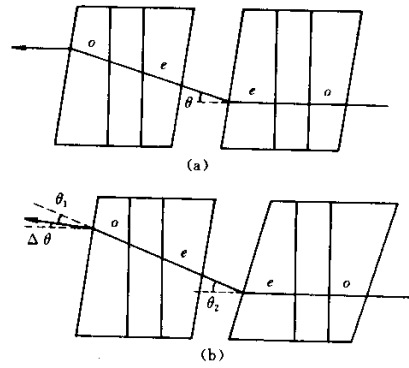


图 4 反向泄漏光的方向

(a) 同种楔角情况 (b) 不同楔角情况

Fig. 4 Direction of leaked backward light

(a) instance for same wedge angle;

(b) instance for different wedge angle

$$ISO = -10 \cdot \log(\Delta_2^2) - 10 \cdot \log \left[e^{-\left(\frac{\Delta\theta}{n_o \cdot \sqrt{A} \cdot \omega_0}\right)^2} \right] \quad (7)$$

当采用不同楔角之后,影响隔离度的主要因素变成了(5)式中的 $\Delta_1^2 \Delta_3^2$ 项,它由 P_{11} 和 P_{12} 光轴夹角误差, P_{21} 和 P_{22} 光轴夹角误差以及两块旋光晶体角度误差 4 个随机量决定,使得峰值隔离度不能达到 80 dB 以上,这 4 个随机量与旋光晶体的波长相关性结合,使得隔离度 ~ 波长曲线(即带宽曲线)没有规律。但是从生产统计看,中心波长处隔离度较高,而且在中心波长附近曲线比较平坦,并不象单级隔离器受旋光晶体波长相关性影响表现出来的峰值特性;在远离中心波长处,旋光晶体的波长相关性占主要作用,隔离度下降。

4 实验结果与讨论

对双级光隔离器的前后两级,分别采用 5° 和 7° 钽酸钇楔角片,并通过光线追剑,合理地设计楔角片尺寸来保证偏振模色散的自补偿;两端与 C-LENS (球透镜)准直器耦合并焊接封装在一起,实现批量生产。隔离度测试系统如图 5 所示,测试时,先将 LD 光源与功率计的测试线融接在一起,存储此时的光功率作为参考值,再将隔离器接入两测试线之间,转动偏振控制器,记录最小隔离度(ISO);插入损耗(IL)和偏振相关损耗(PDL)测试方法类同;带宽测试只需把 LD 光源改为宽带光源,把功率计改为光谱仪;偏振模色散(PMD)用 Agilent 8169A 偏

振控制器, Agilent 8509B 波长偏振分析器和 Agilent 81642A 可调谐激光器组成的专门测试系统测试。所生产的隔离器指标(平均值和样品值)如表 1 所示,从表中可以看出,该隔离器的 IL, PDL 和 PMD 指标均较好,而 ISO 大大提高。另外,在 50 nm 带宽内的隔离度达到 50 dB 以上。

实验结果表明,用等效琼斯矩阵法分析光在双

折射晶体楔角片中的传输特性是非常有效的,得到了制约在线式双级光隔离器隔离度的主要因素是在加工和装配过程中,不能保证楔角片 P_{12} 和 P_{21} 的光轴互相垂直,而是存在角度误差 Δ_2 。这一结论;所提出的对两级采用不同角度的楔角片这一方案,可以很好地解决这个问题,使得隔离度大大提高,而同时又不会影响其他指标。

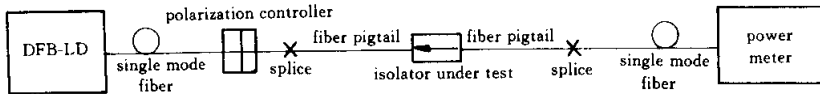


图 5 隔离度测试系统框图

Fig. 5 Diagram of isolation testing system

表 1 产品性能

Table 1 Performance of the products

	IL/dB	ISO/dB	PDL/dB	PMD/ps
Average	0.42	61	0.04	0.015
Sample	0.33	65	0.02	0.012

参 考 文 献

- Xu Peiying, Wang Yutang. The progress of fiber optic isolators [J]. *Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 1997, **8**(3):161~165 (in Chinese)
- Fang Luozhen, Xu Yuanzhong, Liu Shuihua. Miniature optical isolator for the coupling of DFB-LD light source [J]. *Study on Optical Communications* (光通信研究), 1994, **1**~**2**:138~141 (in Chinese)
- Song Huide, Le Zhiqiang, Liu Gongqiang. Theoretical analysis of the properties in polarization-dependent optical isolator [J]. *Journal of China Institute of Communications* (通信学报), 1994, **15**(4):62~66 (in Chinese)
- Wu Fuquan, Song Lianke, Wei Yuhua. Study on several questions about optical isolator [J]. *Journal of Qufu Normal University* (曲阜师范大学学报), 1997, **23**(1):70~72 (in Chinese)
- Yang Dongxiao. Fiber optical isolator with a spherical magneto-optical crystal [J]. *Journal of Zhejiang University* (浙江大学学报), 1999, **33**(2):193~196 (in Chinese)
- Yu Hanyun, Meng Xiaolei, Xiao Xiaoguang. BIG magneto-optical isolator [J]. *Journal of Shandong Normal University* (山东师范大学学报), 1994, **9**(3):75~78 (in Chinese)
- Wu Fuquan, Li Guohua, Dai Zuoxiao. Mathematical description about the principle of optical isolator [J]. *Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 1995, **6**(3):153~156 (in Chinese)
- Wu Fuquan, Zhang Bo, Wang Guanghui. Walk-off mode one-stage polarization-independent isolators [J]. *Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2001, **12**(2):144~146 (in Chinese)
- Xiang Qing, Huang Dexiu. The analysis about isolation and insertion loss of walk-off type optical isolator [J]. *Optical Communication Technology* (光通信技术), 1996, **20**(2):156~160 (in Chinese)
- Xiang Qing, Huang Dexiu. A wedge type optical isolator using a YVO₄ crystal [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(3):225~228 (in Chinese)
- He Huahui, Su Jun, Feng Zekun. Design and analysis of a novel magneto-optical isolator [J]. *J. Magn. Mater Devices* (磁性材料及器件), 1997, **28**(1):1~7 (in Chinese)
- Yu Guohua, Liu Shuihua, Fang Luozhen. Analysis on insertion loss and backward isolation of wedge-type polarization-independent optical isolator [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(8):1108~1112 (in Chinese)
- Jing-Jong Pan, Ming Shih, Jingyu Xu. Dual Stage Optical Device with Low Polarization Mode Dispersion and Wavelength Insensitivity [P]. United States Patent, US005581640A, Dec. 3, 1996
- Gong Xuewen, He Huahui. The design and analysis of a novel polarization-independent optical isolator [J]. *Optical Communication Technology* (光通信技术), 1998, **22**(3):205~210 (in Chinese)
- Zhang Xiucheng, Feng Zekun, He huahui. The design and the analysis of in-line magnetic optical isolator [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.* (华中理工大学学报), 1999, **27**(6):4~6 (in Chinese)
- Shifu Yuan, Nabeel A. Riza. General formula for coupling-loss characterization of single-mode fiber collimators by use of gradient-index rod lenses [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(15):3214~3222