

# 波片型光隔离器隔离性能分析

王吉明<sup>1,2</sup> 吴福全<sup>1</sup> 孔伟金<sup>1</sup> 彭捍东<sup>1</sup>

(1 曲阜师范大学激光研究所, 曲阜 273165)

(2 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 利用光学矩阵方法,给出了由偏光镜、 $\lambda/2$ 波片和 $\lambda/4$ 波片组成的波片型光隔离器的正向导通、反向隔离机理,分析了波片延迟量的偏差和波片方位角的定位精度对隔离度的影响.结果表明,要获得大于30 dB的隔离度,应分别将 $\lambda/2$ 、 $\lambda/4$ 波片的延迟偏差控制在 $\pm 4^\circ$ 、 $\pm 2^\circ$ 以内,方位角的定位偏差应不超过 $\pm 0.4^\circ$ 、 $\pm 0.8^\circ$ .

**关键词** 琼斯矩阵; 隔离度; 延迟偏差; 方位角

**中图分类号** O436.3 **文献标识码** A

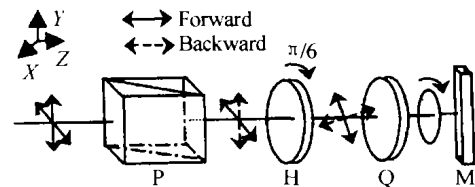
## 0 引言

光从光源到接收系统的传输过程中,会经过许多不同的光学界面,光在每一光学界面处均会有不同程度的反射.回程光累积达到一定程度,会引起光源工作不稳定,产生频率漂移、幅度变化等问题,从而影响整个系统的正常工作.光隔离器即是用来抑制反向光的光无源器件.随着激光应用技术及光通信技术的快速发展,对光隔离器在隔离性能、插入损耗等方面提出了更高的要求.目前用于光纤通信中的光隔离器可分为偏振无关型和偏振相关型<sup>[1-5]</sup>.就光隔离器的组成而言,其中多数是由偏振器件和法拉第旋光器组成的;由于法拉第旋光器的旋光系数与光波长有着密切的关系,因此光隔离器(30 dB以上的隔离度)的带宽一般仅有 $\pm 20 \text{ nm}$ <sup>[6]</sup>.而由 $\lambda/2$ 和 $\lambda/4$ 波片(对中心波长)组成的复合波片具有一定的消色差性<sup>[7]</sup>,恰好弥补了这一缺陷.因而,由该复合波片与偏光镜组成的光隔离器,减弱了对入射光波长变化的敏感性,从而在 $\pm 100 \text{ nm}$ 的光谱范围可获得大于21 dB的隔离度.本文利用光学矩阵方法给出了这种光隔离器的工作原理,并详细分析了波片延迟量的偏差和波片方位角的定位精度对隔离器性能的影响;对如何从分立器件精度和装配精度方面保证该种光隔离器的性能提供了理论依据.

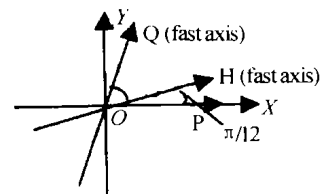
## 1 系统组成及其反向隔离机理

宽带光隔离器的结构及光路如图1(a)所示.其中P为格兰-泰勒棱镜,H为 $\lambda/2$ 波片,Q为 $\lambda/4$ 波片,M为反射镜,使入射光原路返回,用以研究其反向隔离情况.各器件放置的方位角如图1(b)所示:

起偏器透射方向与X轴重合, $\lambda/2$ 波片的快轴与起偏器即X轴成 $\pi/12$ 角度, $\lambda/4$ 波片快轴与 $\lambda/2$ 波片快轴成 $\pi/3$ 角.



(a) Built-up and beam path of the broadband optical isolator consisting of retardation sheets



(b) The devices' positions in the system

图1 波片型光隔离器工作原理

Fig. 1 Principle of operation on the optical isolator consisting of retardation sheets

令入射光为非偏振单色光.其琼斯矢量形式为<sup>[8]</sup>

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

格兰-泰勒棱镜、 $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片的琼斯矩阵分别为

$$J_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$J_H = j \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 & 1/2 \\ 1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$J_Q = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 - (\sqrt{3}/2)j & j/2 \\ j/2 & 1 + (\sqrt{3}/2)j \end{bmatrix} \quad (4)$$

入射光正向通过此三元组合系统后,光矢量变为

$$E_{out(+)} = J_Q J_H J_P E = \frac{j}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} (\sqrt{3}/2 - j/2) E_x \\ (1/2 + \sqrt{3}j/2) E_x \end{bmatrix} = j E_x \begin{bmatrix} \cos(\pi/4) e^{j(-\pi/6)} \\ \sin(\pi/4) e^{j(\pi/3)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

出射光的偏振分量位相分别为  $\phi_x = -\pi/6$ ,  $\phi_y = \pi/3$ . 偏振分量位相差为  $\phi = \phi_y - \phi_x = \pi/2$ , 且两分量振幅比为  $\tan(\pi/4) = 1$ , 故正向出射光为右旋圆偏振光.

下面分析正向出射光被反射后逆向传播的情况. 对于反射光, 以左手坐标系描述, 在这种坐标系下偏光镜及波片的矩阵不变<sup>[9]</sup>. 最后反向通过格兰-泰勒棱镜的光矢量可以表示为

$$E_{out(-)} = J_P J_H J_Q E_{out(+)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} j \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 & 1/2 \\ 1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 - (\sqrt{3}/2)j & j/2 \\ j/2 & 1 + (\sqrt{3}/2)j \end{bmatrix} \frac{j}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} (\sqrt{3}/2 - j/2) E_x \\ (1/2 + \sqrt{3}j/2) E_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)表明: 反射光不能通过光隔离器, 即达到了隔离的目的.

## 2 波片延迟偏差对系统隔离性能的影响

波片加工过程中, 不可避免会存在厚度误差, 而导致延迟偏差. 而波片的延迟量变化将会直接影响光路中偏振态的变换, 更由于实际应用对光隔离器隔离度的苛刻要求, 使得延迟偏差成为分析隔离性能中不能忽略的因素. 图2是  $\lambda/2$  和  $\lambda/4$  波片均具有相位延迟偏差时隔离器的光路图, 因为偏振态变化的影响, 使得反射至格兰-泰勒棱镜的光矢量变为椭圆偏振光, 从而具有反向透射光, 引起隔离度的下降. 下面将分别研究  $\lambda/2$  和  $\lambda/4$  波片延迟偏差对隔离度的影响.

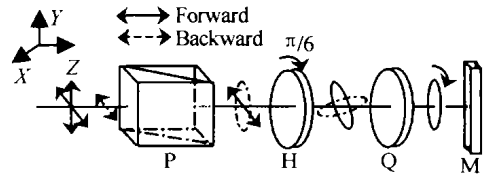


图2 波片延迟误差对系统隔离性能影响的光路图  
Fig. 2 The beam path about the influence on the isolation ratio of the system provoked by the delay deviation of the retardation sheets

1) 对于具有延迟偏差的  $\lambda/2$  波片, 设延迟偏差量为  $\delta_H$ , 此时  $\lambda/2$  波片的琼斯矩阵为<sup>[9]</sup>

$$J_H(\delta_H) = j \begin{bmatrix} -\sin(\delta_H/2) + j(\sqrt{3}/2)\cos(\delta_H/2) & j(1/2)\cos(\delta_H/2) \\ j(1/2)\cos(\delta_H/2) & -\sin(\delta_H/2) - j(\sqrt{3}/2)\cos(\delta_H/2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

那么正、反向出射光矢量为

$$E_{out(+)} = J_Q J_H(\delta_H) J_P E = \frac{1}{\sqrt{2}} E_x \begin{bmatrix} -\sin(\frac{\delta_H}{2}) + \frac{1}{2}\cos(\frac{\delta_H}{2}) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(\sin(\frac{\delta_H}{2}) + \cos(\frac{\delta_H}{2})) \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\frac{\delta_H}{2}) + j\frac{1}{2}(\cos(\frac{\delta_H}{2}) - \sin(\frac{\delta_H}{2})) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$E_{out(-)} = J_P J_H J_Q E_{out(+)} = (-1/2) E_x \begin{bmatrix} -\sin \delta_H + j(\sqrt{3}/2)(\cos \delta_H - 1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由于延迟偏差, 从  $\lambda/2$  波片正向出射的光变为椭圆偏振光, 根据式(8), 最终从  $\lambda/4$  波片正向出射的光变为右旋椭圆偏振光. 而反向入射至偏光镜的光也变为长轴为  $Y$  轴的椭圆偏振光. 根据式(9), 由反向隔离度的定义, 可得

$$IS(\delta_H) = -10 \lg \left[ \frac{1}{4} \sin^2 \left( \frac{\delta_H}{2} \right) (3 + \cos^2 \left( \frac{\delta_H}{2} \right)) \right] \quad (10)$$

2)  $\lambda/4$  波片具有延迟偏差时, 设延迟偏差量为  $\delta_Q$ , 此时  $\lambda/4$  波片的琼斯矩阵为

$$J_Q(\delta_Q) = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta_Q}{2} - \sin \frac{\delta_Q}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}(\cos \frac{\delta_Q}{2} + \sin \frac{\delta_Q}{2}) & j\frac{1}{2}(\cos \frac{\delta_Q}{2} + \sin \frac{\delta_Q}{2}) \\ j\frac{1}{2}(\cos \frac{\delta_Q}{2} + \sin \frac{\delta_Q}{2}) & \cos \frac{\delta_Q}{2} - \sin \frac{\delta_Q}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}(\cos \frac{\delta_Q}{2} + \sin \frac{\delta_Q}{2}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

与 1) 相似, 可以得出正、反向透射光矢量

$$E_{out(+)} = E_x \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} (\cos \frac{\delta_Q}{2} - \sin \frac{\delta_Q}{2}) - j \frac{1}{2} (\cos \frac{\delta_Q}{2} + \sin \frac{\delta_Q}{2}) \\ \frac{1}{2} (\cos \frac{\delta_Q}{2} - \sin \frac{\delta_Q}{2}) + j \frac{\sqrt{3}}{2} (\cos \frac{\delta_Q}{2} + \sin \frac{\delta_Q}{2}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$E_{out(-)} = -\frac{1}{2} E_x \begin{bmatrix} -2 \sin(\delta_Q) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

反向隔离度为

$$IS(\delta_Q) = -10 \lg \sin^2(\delta_Q) \quad (14)$$

图 3 是根据式 (10)、(14) 得出的隔离度分别受  $\delta_H$  (实线)、 $\delta_Q$  (虚线) 影响的变化曲线, 可以看出, 隔离度随延迟量偏差增大而降低. 但对于  $\lambda/2$  和  $\lambda/4$  波片, 延迟偏差对隔离度的影响是不同的, 隔离度对  $\lambda/2$  波片延迟偏差更为敏感.  $\lambda/2$  波片、 $\lambda/4$  波片延迟偏差分别在  $\pm 4^\circ$ 、 $\pm 2^\circ$  之间时, 隔离度优于 30 dB.

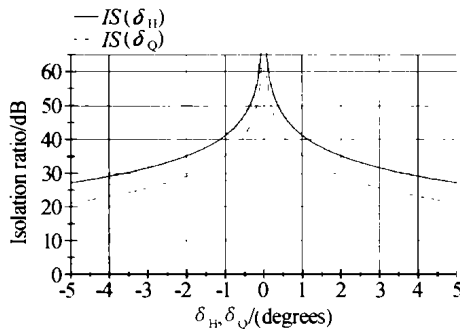


图 3 隔离度与波片延迟误差  $\delta_H, \delta_Q$  的关系  
Fig. 3 Isolation ratio versus the retardation deviation ( $\delta_H, \delta_Q$ ) of the retardation sheets

### 3 波片方位角的定位精度对隔离器性能的影响

在组合此种波片型光隔离器时, 波片快、慢轴方位角的定位精度也会引起光隔离器隔离性能的变化.

仍以格兰-泰勒棱镜的透射光电矢量方向 ( $X$  方向) 为准, 设  $\lambda/2$  波片、 $\lambda/4$  波片快、慢轴方位角定位的偏差分别为  $\varepsilon_H, \varepsilon_Q$ , 如图 4 所示. 这种情况下,  $\lambda/2, \lambda/4$  波片的琼斯矩阵分别为

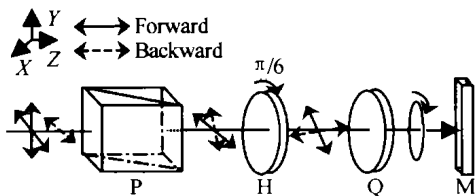


图 4 波片定位精度对系统隔离性能影响的光路图  
Fig. 4 The beam path about the influence on the isolation ratio of the system provoked by the positioning accuracy of the retardation sheets

$$J_H(\delta_H) = j \begin{bmatrix} \cos(\pi/6 + 2\varepsilon_H) & \sin(\pi/6 + 2\varepsilon_H) \\ \sin(\pi/6 + 2\varepsilon_H) & -\cos(\pi/6 + 2\varepsilon_H) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$J_Q(\varepsilon_Q) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 + j \cos(5\pi/6 + 2\varepsilon_Q) & j \sin(5\pi/6 + 2\varepsilon_Q) \\ j \sin(5\pi/6 + 2\varepsilon_Q) & 1 - j \cos(5\pi/6 + 2\varepsilon_Q) \end{bmatrix} \quad (16)$$

那么, 光矢量正反向通过此隔离系统后的透射光矢量分别为

$$E_{out(+)} = J_Q J_H J_P E = \frac{j E_x}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos(\pi/6 + 2\varepsilon_H) + j \cos[2\pi/3 + 2(\varepsilon_Q - \varepsilon_H)] \\ \sin(\pi/6 + 2\varepsilon_H) + j \sin[2\pi/3 + 2(\varepsilon_Q - \varepsilon_H)] \end{bmatrix} \quad (17)$$

可知此时出射光为右旋正椭圆偏振光.

正向出射光被反射后逆向通过三元系统, 光矢量变为

$$E_{out(-)} = J_P J_H J_Q E_{out(+)} = (j E_x) \begin{bmatrix} \sin[2(\varepsilon_Q - 2\varepsilon_H)] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

即此时从格兰-泰勒棱镜有  $X$  方向的光矢量反向射出.

这是因为: 光矢量正向传播过程中, 由于  $\lambda/2$  波片方位角的微小变化, 从  $\lambda/2$  波片出射的光矢量偏振方向与不考虑偏差时相比有一个微小的偏移, 入射至方位角有微小变化的  $\lambda/4$  波片后, 出射的光矢量由圆偏振光变为椭圆偏振光 (以  $\lambda/4$  波片的快慢轴为长短轴). 反向传播时, 从  $\lambda/4$  波片出射的光矢量为在与  $X$  轴成约  $2\pi/3$  角的偏振光, 透过  $\lambda/2$  波片后, 变为电矢量与  $X$  轴不垂直的线偏振光, 那么就有光矢量反向通过格兰-泰勒棱镜, 从而会影响整个系统的隔离性能. 此时的隔离度为

$$IS = -10 \lg(I_{out(-)} / I_{in(-)}) = -10 \lg[\sin^2 2(\varepsilon_Q - 2\varepsilon_H)] \quad (19)$$

1) 若  $\varepsilon_Q = 0$ ,  $\lambda/4$  波片延迟量为理想的  $\pi/2$ , 隔离度与  $\varepsilon_H$  的关系为

$$IS(\varepsilon_H) = -10 \lg[\sin^2(4\varepsilon_H)] \quad (20)$$

2) 若  $\varepsilon_H = 0$ ,  $\lambda/2$  波片延迟量为理想的  $\pi$ , 隔离度与  $\varepsilon_Q$  的关系为

$$IS(\varepsilon_Q) = -10 \lg[\sin^2(2\varepsilon_Q)] \quad (21)$$

3) 若令  $\tau = \varepsilon_Q - 2\varepsilon_H$ , 隔离度为

$$IS = -10 \lg[\sin^2(2\tau)] \quad (22)$$

隔离度与  $\tau$  的关系与 2) 中情况相似.

图 5 给出了隔离度受波片方位角偏差  $\varepsilon_H$  (实

线)、 $\varepsilon_Q(\tau)$ (虚线)影响的理论曲线. 从图中可以看出, 隔离度随偏差量  $\varepsilon_H$ 、 $\varepsilon_Q$  的变化而变化, 且两者变化情况基本相似, 但隔离度受  $\varepsilon_H$  变化的影响比  $\varepsilon_Q$  更为显著, 即隔离度受  $\lambda/2$  波片方位角偏差的影响要大于  $\lambda/4$  波片方位角偏差的影响. 可以看出: 1) 当  $|\varepsilon_H| < 0.4^\circ$  时, 隔离度达到 30 dB 以上; 2) 当  $|\varepsilon_Q| < 0.8^\circ$  时, 隔离度满足 30 dB; 3) 当  $|\tau| < 0.8^\circ$  时, 满足隔离器工作需要, 且当  $\tau = 0$ , 即  $\varepsilon_Q = 2\varepsilon_H$ ,  $\lambda/4$  波片的方位角偏差为  $\lambda/2$  波片方位角偏差 2 倍时, 隔离度趋向无穷大, 这种情况下隔离器工作性能趋向于理想化, 它与  $\varepsilon_Q = \varepsilon_H = 0$ , 即波片无方位角偏差的理想情况下隔离效果相同.

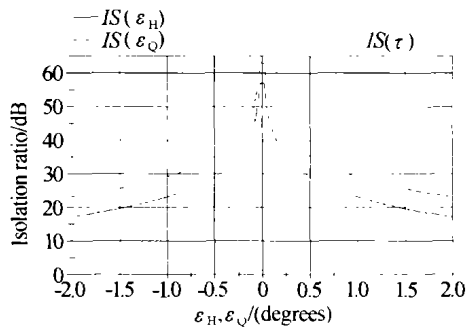


图 5 隔离度与波片方位角的定位偏差 ( $\varepsilon_H, \varepsilon_Q, \tau$ ) 的关系  
Fig. 5 Isolation ratio versus positional deviation ( $\varepsilon_H, \varepsilon_Q, \tau$ ) of the retardation sheets

## 4 结论

波片型光隔离器因其插入损耗低、能在大的光谱范围内实现对光的有效隔离, 因此可以在较宽的光谱范围用来消除反馈光. 通过对  $\lambda/2$  与  $\lambda/4$  波片组合型宽带光隔离器隔离性能的分析, 可以看出, 波片的相位延迟偏差及波片的方位角定位精度均会不同程度地影响光隔离器的性能. 一般情况下,  $\lambda/2$  波片的延迟偏差应控制在  $\pm 4^\circ$  以内, 方位角的定位偏差应不超过  $\pm 0.4^\circ$ ;  $\lambda/4$  波片的延迟偏差应控制在  $\pm 2^\circ$  以内, 方位角的定位偏差不超过  $\pm 0.8^\circ$ . 若要求光隔离器有

更高隔离性能, 一定要注意波片延迟量的精度以及其方位角的定位精度. 另外, 对于不同的中心波长, 通过调整偏光镜与  $\lambda/2$  波片快轴间的角度, 均可使其在大的波长范围内实现有效光隔离.

## 参考文献

- 1 Jopson R M, Eisenstein G, Earl H E, et al. Bulk optical isolator tunable from 1.2  $\mu\text{m}$  to 1.7  $\mu\text{m}$ . *Electronics Letters*, 1985, **21**(18): 783 ~ 784
- 2 Ma Miaoming, Tao Shangping. High-isolation optical isolator using a BiCaInVIG single crystal. *Applied Optics*, 1992, **31**(21): 4122 ~ 4124
- 3 Chang Kok Wai, Sorin W V. High-performance single-mode fiber polarization-independent isolators. *Optics Letters*, 1990, **15**(8): 449 ~ 451
- 4 马晓明. 带光隔离器的掺铒光纤放大器性能分析. *光子学报*, 2002, **31**(2): 178 ~ 182  
Ma X M. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2): 178 ~ 182
- 5 Nakajima K, Nunajiri Y. New design of polarization-independent optical isolator with high performance. *IEEE Trans Magnetics*, 1991, **27**(6): 5399 ~ 5401
- 6 林学煌. 光无源器件. 北京: 人民邮电出版社, 2001. 164 ~ 190  
Lin X H. *Optical passive device*. People's Posts & Telecommunications Publishing House, 2001. 164 ~ 190
- 7 苏美开, 李国华, 宋连科. 消色差  $\lambda/4$  波片. *激光技术*, 1996, **20**(1): 29 ~ 31  
Su M K, Li G H, Song L K. *Laser Technology*, 1996, **20**(1): 29 ~ 31
- 8 吴福全, 李国华, 代作晓. 光隔离器原理的数学描述. *光电子·激光*, 1995, **6**(3): 153 ~ 156  
Wu F Q, Li G H, Dai Z X. *Journal of Optoelectronics · Lasers*, 1995, **6**(3): 153 ~ 156
- 9 阎吉祥, 魏光辉, 哈流柱. 矩阵光学. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 144 ~ 162  
Yan J X, Wei G H, Ha L Z. *Matrix Optics*. Beijing: Enginery Industry Press, 1995. 144 ~ 162

## Analysis of Isolation Performance on Optical Isolator Consisting of Retardation Sheets

Wang Jiming<sup>1,2</sup>, Wu Fuquan<sup>1</sup>, Kong Weijin<sup>1</sup>, Peng Handong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laser Research Institute of Qufu Normal University, Qufu 273165

<sup>2</sup> Shanghai Institute of Optical and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

Received date: 2003-06-30

**Abstract** The optical isolator discussed in this paper consists of a polarizer, a  $\lambda/2$  wave plate and a  $\lambda/4$  wave plate. With Jones matrix vector representation, the mechanics of forward transmission and backward isolation is given. And the relationship between isolation ratio and the defer deviation of the retardation sheets and the positioning accuracy of the angle of position is also analyzed. In order to obtain the isolation ratio above 30 dB, the permissible defer deviation range of  $\lambda/2$  and  $\lambda/4$  should be controlled respectively among  $\pm 4^\circ$  and  $\pm 2^\circ$ . And the positional deviation range should be among  $\pm 0.4^\circ$  and  $\pm 0.8^\circ$ .

**Keywords** Jones matrix; Isolation ratio; Retardation deviation; Angle of position



**Wang Jiming** was born in 1977. He received his master's degree from Laser Research Institute of Qufu Normal University in June, 2003. Now he is a Ph. D. student in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His research interest is study of polarized light on optical crystal.