

文章编号: 1001-3806(2009)06-0654-03

## 二元复合波片退偏器的研究

宋师霞, 宋连科\*

(曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165)

**摘要:** 为了研究二元复合波片的退偏性能, 采用了理论和实验相结合方法, 对不同的波片复合后的米勒矩阵形式进行了理论分析和实验验证。结果表明, 让两波片以不同的角速度绕光线为轴旋转, 当复合波片为一个  $\lambda/4$  波片和一个  $\lambda/2$  波片组合时, 只要它们的角速度满足一定的比例时, 可以组合成一个比较理想的退偏器; 当复合波片为两个  $\lambda/4$  波片组合或为两个  $\lambda/2$  波片组合时, 无论怎样旋转都不能组合成理想退偏器。理论和实验相符合。这对指导二元复合波片退偏器的制作和在激光工程中应用具有参考意义。

**关键词:** 光学器件; 退偏器; 波片; 米勒矩阵

**中图分类号:** O436.3      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.027

## Study about depolarizer with compound binary wave-plate

SONG Shi-xia, SONG Lian-ke

(Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

**Abstract:** In order to study the depolarization of compound binary wave plates, Mueller matrixes of different combined wave-plates were studied by means of theoretical analysis and experimental verification. An ideal depolarizer can be combined with a  $\lambda/2$  wave-plate and a  $\lambda/4$  wave-plate rotating at different angular velocities with a certain ratio. Ideal depolarization can't be obtained from the combination of two  $\lambda/4$  wave-plates or two  $\lambda/2$  wave-plates. Experimental results are in agreement with those in theory. This study is a good guidance for the fabrication of compound binary wave plates and their application in laser engineering.

**Key words:** optical devices; depolarizer; wave-plate; Mueller matrix

### 引言

自从1808年马吕斯发现光的偏振现象以来, 偏振光在光通信领域得到了广泛的应用。随着光通信技术的日趋成熟, 偏振光所引起的偏振相关损害<sup>[1-3]</sup>越来越不可忽视。为了消除偏振相关损害, 众多光电子产业人士已做了很多重要工作。消除偏振损害的一个非常有效的手段就是使用退偏器<sup>[4]</sup>。退偏器是将偏振光变成非偏振光的一种偏振器件, 它可以解决通信系统、测量仪器及传感器中的偏振相关问题。目前问世的退偏器有Lyot型退偏器、直角棱镜退偏器、楔型晶体退偏器、Lyot改进型退偏器等。这些退偏器, 有的在使用时需要首先调整器件的晶体光轴, 使其与入射光束的偏振面成 $45^\circ$ 角, 而且会产生光束偏折和一定的分束, 造成使用上的诸多不便; 有的仅对多色光退偏效果好, 对单色光则效果欠佳; 有的对线偏光和椭圆偏光退偏效果好, 对圆偏光则无能为力<sup>[5]</sup>。随着波片在激光技术中的广泛应用,

有人提出利用复合波片研制三元复合延迟型退偏器<sup>[6]</sup>, 也有人提出了由光轴在某一方向上具有周期性旋转波片组成的新型退偏器<sup>[7]</sup>。把二元复合波片的米勒矩阵与理想退偏器的米勒矩阵对比, 发现让两波片以不同的角速度绕光线为轴旋转, 当复合波片为一个  $\lambda/4$  波片和一个  $\lambda/2$  波片组合时, 只要它们的角速度满足一定的比例时, 可以组合成一个比较理想的退偏器。而当复合波片为两个  $\lambda/4$  波片组合或为两个  $\lambda/2$  波片组合时无论怎样旋转都不能组合成理想退偏器。

### 1 退偏器的矩阵形式

设  $M$  为退偏器的矩阵,  $S_0, S_1, S_2, S_3$  为入射到退偏器的任意偏振光的斯托克斯分量, 出射光的光波为<sup>[8]</sup>:

$$M \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0' \\ S_1' \\ S_2' \\ S_3' \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $S_0', S_1', S_2', S_3'$  为出射光的斯托克斯分量。

非偏振光是指偏振分量的时间平均值为0的光, 按照这一定义则  $S_1', S_2', S_3'$  的平均值分别为0<sup>[7]</sup>, 即:

作者简介: 宋师霞(1981-), 女, 硕士研究生, 现主要从事激光偏光方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: lksong@mail.qfnu.edu.cn

收稿日期: 2008-07-21; 收到修改稿日期: 2008-12-24

$$\begin{cases} S_1' = M_{21}S_0 + M_{22}S_1 + M_{23}S_2 + M_{24}S_3 = 0 \\ S_2' = M_{31}S_0 + M_{32}S_1 + M_{33}S_2 + M_{34}S_3 = 0 \\ S_3' = M_{41}S_0 + M_{42}S_1 + M_{43}S_2 + M_{44}S_3 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $M_{ij}(i=1,2,3,4;j=1,2,3,4)$  为瞬时值,若观察时间为  $t$ , 应该有:

$$\frac{1}{t} \int_0^t M_{21} dt = \frac{1}{t} \int_0^t M_{22} dt \dots = \frac{1}{t} \int_0^t M_{44} dt = 0 \quad (3)$$

另一方面,由于当线偏振光通过一旋转的偏振器或波片时,如果不考虑吸收和反射等因素,其光强不变,在(1)式中,即是  $S_0' = S_0$ 。故理想退偏器的矩阵形式可表示为:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 2 对 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片的不同组合的讨论

建立如图1的坐标系,  $R_1, R_2$  分别表示两个波片,

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2'^2 & C_2'S_2' & -S_2' \\ 0 & C_2'S_2' & S_2'^2 & C_2' \\ 0 & S_2' & -C_2' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2^2 & C_2S_2 & -S_2 \\ 0 & C_2S_2 & S_2^2 & C_2 \\ 0 & S_2 & -C_2 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2'^2C_2^2 + C_2'S_2'C_2S_2 - S_2'S_2 & C_2'^2C_2S_2 + C_2'S_2'S_2^2 + S_2'C_2 & -C_2'^2S_2 + C_2'S_2'C_2 \\ 0 & C_2'S_2'C_2^2 + S_2'^2C_2S_2 + C_2'S_2 & C_2'S_2C_2S_2 + S_2'^2S_2^2 - C_2'C_2 & -C_2'S_2'S_2 + S_2'^2C_2 \\ 0 & S_2'C_2^2 - C_2'C_2S_2 & S_2'C_2S_2 - C_2'S_2^2 & -S_2'S_2 - C_2'C_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $C_2 = \cos 2\omega_1 t, S_2 = \sin 2\omega_1 t, C_2' = \cos 2\omega_2 t, S_2' = \sin 2\omega_2 t$ 。

由(5)式知  $M_{22} = \frac{1}{T} \int_0^T (C_2'^2C_2^2 + C_2'S_2'C_2S_2 - S_2'S_2) dt$ ,

经展开,有:  $M_{22} = \frac{1}{4T} \int_0^T [\cos 4(\omega_2 - \omega_1)t + 1 + \cos 4\omega_1 t +$

$\cos 4\omega_2 t + 2\cos 2(\omega_1 + \omega_2)t - 2\cos 2(\omega_1 - \omega_2)t] dt$  可以验证,为保证(5)式其它矩阵元为0,则应该满足:

$\int_0^T \cos 4(\omega_2 - \omega_1)t dt = 0, \int_0^T \cos 4\omega_1 t dt = 0, \int_0^T \cos 4\omega_2 t dt =$

$0, \int_0^T \cos 2(\omega_2 + \omega_1)t dt = 0, \int_0^T \cos 2(\omega_1 - \omega_2)t dt = 0$ , 则

$M_{22} = 1/4 \neq 0$ 。由此可以看出,两  $\lambda/4$  波片组合不可能构成理想退偏器。

### 2.2 两个 $\lambda/2$ 波片的组合

当  $R_1, R_2$  分别为两个  $\lambda/2$  波片,其旋转的角速度分别为  $\omega_1, \omega_2$  时,则两波片组合而成的新矩阵  $M$  可表示为:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_4' & S_4' & 0 \\ 0 & S_4' & -C_4' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_4 & S_4 & 0 \\ 0 & S_4 & -C_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} =$$

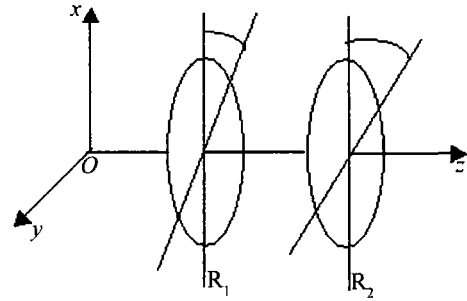


Fig. 1 Compound binary wave-plate

让两波片以不同的角速度绕光线为轴旋转,即波片快轴与系统坐标  $O-x$  的角是时间的函数。且规定在初始时刻,其快轴与  $x$  轴重合,此时,快轴与  $x$  轴的夹角与时间的函数关系可表示为  $\theta = \omega t, \omega$  为波片的旋转的角速度。

### 2.1 两个 $\lambda/4$ 波片的组合

当  $R_1, R_2$  分别为两个  $\lambda/4$  波片,它们旋转的角速度分别为  $\omega_1, \omega_2$  时,则两波片组合而成的新矩阵  $M$  为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_4'C_4 + S_4'S_4 & C_4'S_4' - S_4'C_4 & 0 \\ 0 & S_4'C_4 - C_4'S_4 & S_4'S_4 + C_4'C_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $C_4 = \cos 4\omega_1 t, S_4 = \sin 4\omega_1 t, C_4' = \cos 4\omega_2 t, S_4' = \sin 4\omega_2 t$ 。显然可以看出  $M_{44} = 1$ ,故两  $\lambda/2$  波片组合也不可能构成理想退偏器。

### 2.3 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片组合

当  $R_1, R_2$  分别为一个  $\lambda/4$  波片和一个  $\lambda/2$  波片,它们旋转的角速度分别为  $\omega_1, \omega_2$  时,两波片组合而成的新矩阵  $M$  可表示为:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2'^2 & C_2'S_2' & -S_2' \\ 0 & C_2'S_2' & S_2'^2 & C_2' \\ 0 & S_2' & -C_2' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_4 & S_4 & 0 \\ 0 & S_4 & -C_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2'C_4 + C_2'S_2'S_4 & C_2'^2S_4 - C_2'S_2'C_4 & S_2' \\ 0 & C_2'S_2'C_4 + S_2'^2S_4 & C_2'S_2'S_4 - S_2'^2C_4 & -C_2' \\ 0 & S_2'C_4 - C_2'S_4 & S_2'S_4 + C_2'C_4 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $C_4 = \cos 4\omega_1 t$ ,  $S_4 = \sin 4\omega_1 t$ ,  $C_2' = \cos 2\omega_2 t$ ,  $S_2' = \sin 2\omega_2 t$ 。可以验证, 当  $\omega_1 : \omega_2 = n : 1$  ( $n \in N, n > 1$ ) 时, 设  $R_2$  的周期为  $T$ , 并且满足  $\omega_2 = \pi/T$  时,  $M_{ij} = 0$  ( $i, j = 2, 3, 4$ ), 此时这一组合可组成一退偏器。

### 3 试验设计及结果分析

#### 3.1 实验原理

与  $x$  轴的夹角为  $\theta$  的线偏振光通过此组合时, 令  $S, S'$  分别表示输入光线和输出光线的斯托克斯矢量, 则它们和  $M$  的关系可以用下面的形式来表示:

$$S' = MS = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \cos\theta \\ \sin\theta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据偏振度的定义<sup>[9]</sup>可知, 出射光的偏振度大小为:

$$P = \frac{(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{1/2}}{S_0} = 0 \quad (9)$$

#### 3.2 实验装置

试验装置如图2所示, L为激光光源(632.8nm),

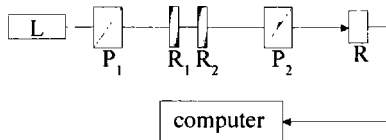


Fig. 2 Output power distribution

$P_1$  为起偏棱镜,  $P_2$  为检偏棱镜,  $R_1, R_2$  分别为  $\lambda/4, \lambda/2$  波片, R 为光电探测器。  $R_1$  和  $R_2$  分别固定在一速度可调而且转速可调的可控电机上。  $P_2$  也由一步进电机带动, 绕光线轴缓慢转动。探测器的相应时间为 20ms。

#### 3.3 实验数据及误差分析

图3是偏振光通过两旋转波片时的光强分布。从

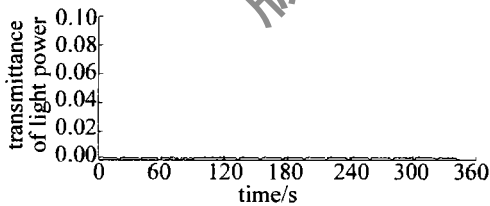


Fig. 3 Light power distribution of emergent light

理论分析可知, 偏振度为 0 的光强图形分布应是一条平滑的直线。但从图中看到的试验曲线分布有振荡趋势。如果没有这些振荡, 实验结果与理论结果是完全相符的。产生这样的原因很多, 其一是光源的稳定性, 由于本实验用的是氦氖激光器, 其光输出功率不是很稳定; 其二是旋转的比率, 理论上要求两者的比率是  $\omega_1 : \omega_2 = 1 : 2$ , 这对于两波片分别用两不同的控制电机来说其误差是不可忽视的; 其三是实验初始时要求两

波片的快轴在同一方向, 在实验过程中可能有所偏差; 其四是环境因素, 由于实验是测量出射光的光强, 周围杂散光对探测器也会产生意想不到的影响。

为了更好地分析光源起伏对系统误差的影响, 对光源起伏进行了随机测试。图4是其中一段。在步进电机转动1周中, 可以看出光源的振荡还是很大的, 这对实验测量的误差是不可忽视的。因此, 解决好光源震荡对于实验很重要。

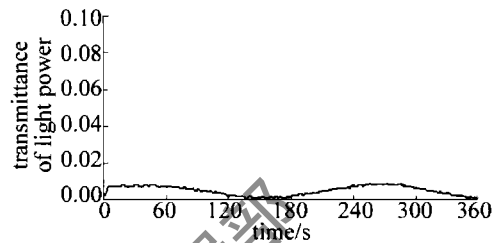


Fig. 4 Light intensity variation of laser source

### 4 结论

可用两个延迟量不同的波片复合后作退偏器, 两个延迟量相同的波片复合后不能作退偏器。当复合波片为一个  $\lambda/4$  波片和一个  $\lambda/2$  波片组合而成时, 在  $\lambda/4$  波片和  $\lambda/2$  波片角速度满足一定比例情况下, 它们的退偏效果非常的理想。实验中验证了满足一定角速度的旋转的  $\lambda/4$  波片和  $\lambda/2$  波片可以退偏。但实验过程中存在着误差, 这些误差与光源的稳定性、两波片的不同步性以及环境等因素有关。

#### 参考文献

- [1] SCHMUCK H. Effect of polarization-mode-dispersion in fiber-optic millimeter-wave systems [J]. Electron Lett, 1994, 30(8): 1503-1504.
- [2] LU P, CHEN L, BAO X. System outage probability due to the combined effect of PMD and PDL [J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(10): 1805-1808.
- [3] POOLE C D, DARCIE T E. Distortion related to polarization-mode dispersion in analog lightwave systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(11): 1749-1759.
- [4] KAZAMI H, MATSUSHITA S I, EMORI Y, et al. Development of a crystal-type depolarizer [J]. Furukawa Review, 2003(23): 44-47.
- [5] CHI H, GAO J, XU S L. A novel practical quasi-monochromatic depolarizer [J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(8): 1097-1102 (in Chinese).
- [6] LI G H, ZHANG D W. Three element compound delayed depolarizer [J]. Laser Technology, 2001, 25(6): 430-432 (in Chinese).
- [7] BIENER C, NIV A, KLEINER V, et al. Computer-generate dinfrared depolarizer using space-variant sub wavelength dielectric gratings [J]. J O S A, 2003, 28(16): 1400-1402.
- [8] LIAO Y B. Polarization optics [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2003: 226-230 (in Chinese).
- [9] WEI G H, YAN J X, HA L Zh. Matrix optical [M]. Beijing: Ordnance Press, 1985: 185 (in Chinese).