

文章编号: 1001-3806(2007)04-0391-03

波片组合在调整偏振态势中的应用与分析

刘云安, 李国华*, 彭捍东

(曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165)

摘要: 为了获得椭圆率角不变、椭圆方位角可连续变化和椭圆率角可连续变化、椭圆方位角不变的椭圆偏振光, 采用矩阵光学方法对按一定方位角摆放的 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片, 在线偏振光通过后的偏振态变化, 进行了理论分析和实验验证, 取得了可靠的数据。结果表明, 理论分析是正确的, 这一结果对光路调整和偏振态的转换是有帮助的。

关键词: 物理光学; 偏振光; 矩阵光学; 斯托克斯矢量; 波片

中图分类号: O436.3 **文献标识码:** A

The application and analysis of wave-plate combination in polarization state adjustment

LIU Yun-an, LI Guo-hua, PENG Han-dong

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

Abstract: In order to obtain an elliptically polarized light, whose ellipticity angle to be invariable and the elliptical azimuth may continuously change, or the ellipticity angle may continuously change and the elliptical azimuth invariable, the polarization is analyzed based on the matrix optics method when the linearly polarized light transmits the $\lambda/4$ and $\lambda/2$ wave-plates, which are placed according to the certain azimuth, the reliable data are obtained. The results indicate our theoretical analysis is correct and it is helpful to the path of rays adjustment and the polarization condition transition.

Key words: physical optics; polarized light; matrix optics; Stokes vector; wave-plate

引 言

在偏光技术和光信息的应用和研究中,常遇到对偏振光的偏振状态调整问题,即通过线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光偏振态之间的相互转换及对左(右)旋偏振光及其主轴方位的调整等来获得具有不同偏振态的偏振光。常见的方法可分为晶体波片法^[1]、光纤法^[2,3]、光电晶体法^[2~4]、旋光干涉^[5,6]等方法,其中晶体波片法以其操作简便、低成本、易实现光机电一体化控制等特点在此领域具有十分重要的地位^[7~13]。作者利用矩阵光学的方法分析了利用常规光学器件—— $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片组合来实现偏振光的偏振态调整。

1 理论分析

1.1 椭圆率角不变、椭圆方位角可连续变化

首先,用矩阵光学的方法来分析如何利用线偏振

光依次通过 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片来获得椭圆率角不变、椭圆方位角可连续变化的椭圆偏振光。组合器件的光路图及建立的坐标系如图 1 所示, x 轴沿水平方向, y 轴沿竖直方向, z 轴为光波传播方向。

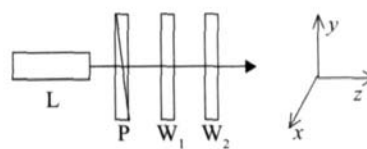


Fig 1 Diagram of polarization state transformation

图中, L 为激光光源; P 为起偏器,其透振方向与 x 轴夹角为 α ; W_1 为 $\lambda/4$ 波片,其快轴方向与 x 轴夹角为 θ ; W_2 为 $\lambda/2$ 波片,其快轴方向与 x 轴夹角为 β 。

由矩阵光学^[14]知识易知,若线偏振光沿 z 轴方向传播,则:

(1)偏振方向与 x 轴成 α 角的线偏光的斯托克斯矢量:

$$S = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\alpha \\ \sin 2\alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2)快轴方向与 x 轴成 θ 角的 $\lambda/4$ 波片的米勒矩阵:

作者简介:刘云安(1979-),男,硕士研究生,现主要从事偏光测量的研究。

* 通讯联系人。E-mail: ghli@163169.net

收稿日期:2006-06-01;收到修改稿日期:2006-09-12

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2^2 & c_2 s_2 & -s_2 \\ 0 & c_2 s_2 & s_2^2 & c_2 \\ 0 & s_2 & -c_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $c_2 = \cos 2\theta$, $s_2 = \sin 2\theta$ 。

(3)快轴方向与 x 轴成 β 角的 $\lambda/2$ 波片的米勒矩阵:

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_4 & s_4 & 0 \\ 0 & s_4 & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $c_4 = \cos 4\theta$, $s_4 = \sin 4\theta$ 。

由(1)式~(3)式易得,沿 z 轴方向传播,偏振方向与 x 轴成 α 角的线偏光依次通过快轴与 x 轴成 θ 角的 $\lambda/4$ 波片和快轴与 x 轴成 β 角的 $\lambda/2$ 波片后,出射偏振光的斯托克斯矢量:

$$S_1 = SM_1M_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2(\alpha - \theta) \cos 2(2\beta - \theta) \\ \cos 2(\alpha - \theta) \sin 2(2\beta - \theta) \\ \sin 2(\alpha - \theta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

可以看出,出射偏振光的偏振态仅与参量 α , θ , β 有关。

在(4)式中,若令 $\alpha = 0$, $\beta = 0$,即令由起偏器出射的线偏振光的振动方向及 $\lambda/2$ 波片的快轴方向与 x 轴平行,那么出射光的斯托克斯矢量:

$$S_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos^2 2\theta \\ \sin 2\theta \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

由(5)式可以看出,此时出射光的偏振态仅与 $\theta^{[4]}$ 有关,则:当 $0 < \theta < \pi/2$ 时,出射光为右旋偏振光;当 $\theta = \pi/2$ 或 0 时,出射光为线偏振光;当 $0 < \theta < \pi$ 时,出射光为左旋偏振光;当 θ 在 $[\pi, 2\pi]$ 内变化时,将是上述结果的重复。

在(4)式中,若令 $\alpha = 0$, β 为定值,即令由起偏器出射的线偏振光的振动方向与 x 轴平行, $\lambda/2$ 波片固定不动,那么出射光的斯托克斯参量:

$$S_{1,\lambda/2} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(2\theta) \cos 2(2\beta - \theta) \\ \cos(2\theta) \sin 2(2\beta - \theta) \\ -\sin(2\theta) \end{bmatrix}, (\theta \text{为变量}) \quad (6)$$

由(5)式与(6)式相比较可得,椭圆偏振光通过快轴与 x 轴成 β 角的 $\lambda/2$ 波片后,出射光偏振态的椭圆率角不变,但椭圆方位角,即长轴与 x 轴之间的夹角旋转了 2β 。

在(4)式中,若令 $\alpha = 0$, θ 为定值,即令由起偏器

出射的偏振光的振动方向与 x 轴平行, $\lambda/4$ 波片固定不动,那么出射光的斯托克斯参量:

$$S_{1,\lambda/4} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(2\theta) \cos 2(2\beta - \theta) \\ \cos(2\theta) \sin 2(2\beta - \theta) \\ -\sin(2\theta) \end{bmatrix}, (\beta \text{为变量}) \quad (7)$$

此时出射光的偏振态只与 β 有关。若调整 β 角,即旋转 $\lambda/2$ 波片,则出射光为椭圆率角不变、椭圆方位角随 β 不断变化的椭圆偏振光(当 $\theta = \beta = 0$ 时为线偏光)。

1.2 椭圆率角可连续变化、椭圆方位角不变

下面分析如何利用线偏光依次通过 $\lambda/2$ 波片和 $\lambda/4$ 波片来获得椭圆方位角不变、椭圆率角可连续变化的椭圆偏振光。组合器件光路图及建立的坐标系与图1相同, x 轴沿水平方向, y 轴沿竖直方向, z 轴为光波传播方向。

但图中, L 为激光光源; P 为起偏器,其透振方向与 x 轴的夹角为 α ; W_1 为 $\lambda/2$ 波片,其快轴方向与 x 轴夹角为 β ; W_2 为 $\lambda/4$ 波片,其快轴方向与 x 轴夹角为 θ 。

由(1)式~(3)式易得,偏振方向与 x 轴成 α 角的线偏光依次通过快轴与 x 轴成 β 角的 $\lambda/2$ 波片和快轴与 x 轴成角 θ 的 $\lambda/4$ 波片后,出射光的斯托克斯参量:

$$S_2 = SM_2M_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\theta \cos(2\alpha - 4\beta - 2\theta) \\ \sin 2\theta \cos(2\alpha - 4\beta - 2\theta) \\ \sin(2\alpha - 4\beta - 2\theta) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,若令 $\alpha = 0$, θ 为定值,即令由起偏器出射的偏振光的振动方向与 x 轴平行, $\lambda/4$ 波片固定不动,那么出射光的斯托克斯参量:

$$S_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\theta \cos 2(2\beta + \theta) \\ \sin 2\theta \cos 2(2\beta + \theta) \\ -\sin 2(2\beta + \theta) \end{bmatrix}, (\beta \text{为变量}) \quad (9)$$

此时出射光偏振状态只与 β 有关。调整 β 角,即旋转 $\lambda/2$ 波片,则出射光为椭圆方位角不变、椭圆率角随 β 不断变化的椭圆偏振光(当 $\theta = \beta = 0$ 时为线偏光)。

2 实验验证及误差分析

为了对理论推导进行验证,搭建了如图2所示的实验光路。

首先,对同一 β 旋转角度进行了多次测量,结果重复性很好,结果如表1所示。这表明所建立的测量系统是稳定可靠的。

然后,对两种情况进行选点测试,结果如表2所示。

从表2可以看出,实验测量结果与理论推导符合得很好。这表明作者的理论推导是正确的。

Table 1 The test result

test number when β cirumngy rate is 0	1	2	3	4	5	6	7	8
elliptical azimuth/($^{\circ}$)	0	359.42	1.61	357.86	359.28	358.31	1.90	0.25
	average 359.82				most greatly relative deviation 2.08			
ellipticity angle/($^{\circ}$)	48.15	49.58	48.32	47.45	49.87	48.56	47.98	48.83
	average 48.59				most greatly relative deviation 1.28			

Table 2 The test results

revolving angle of β /($^{\circ}$)	0	20	40	60	80	100	120	140
elliptical azimuth/($^{\circ}$)	0	38.37	87.89	119.22	160.46	202.3	239.52	281.63
ellipticity angle/($^{\circ}$)	0	-39.85	-80.44	-118.72	-159.74	-199.83	-241.17	-281.38

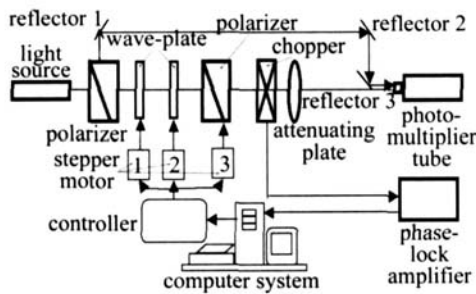


Fig 2 The test setup

参考文献

[1] MA I T, NOSU K, YAMA GUCHI H. Optical polarization control utilizing an optical heterodyne detection scheme [J]. Electron Lett, 1985, 21 (2): 52~53.

[2] NOE R, HEDRICH H, HOFMANN D. Endless polarization control systems for coherent optics [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1988, 6 (7): 1199~1208.

[3] AARTS W H J, KHOE G D. New endless polarization control method using three fiber squeezers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1989, 7 (7): 1033~1043.

[4] HE ISMANN F. Ntegrated-optic polarization transformer for reset-free endless polarization control [J]. IEEE J Q E, 1989, 25 (8): 1898~1906.

[5] ZHAO P T, LI G H, PENG H D *et al* New design of optical activity measurement system [J]. Laser Technology, 2005, 29 (5): 504~506 (in Chinese).

[6] RUMBAUGH S H, JONES M D, CASPERSON L W. Polarization control for coherent systems using nematic liquid crystals [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1990, 8 (3): 459~465.

[7] ZHANG B, HUANG D X. Characteristic analysis of 1/4 wave-plate with HR coating [J]. Laser Technology, 2003, 27 (1): 29~30 (in Chinese).

[8] ZHOU J, CHENG Zh J, SU G Y. A synthetic analysis of the composite quarter wave plate [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2001, 12 (4): 368~370 (in Chinese).

[9] ZHAO Sh, WU F Q, TANG H J *et al* The study in fast-axis and slow-axis equivalent character of 1/2 retard slice [J]. Laser Journal, 2005, 26 (5): 44~45 (in Chinese).

[10] DENG H Y, WU F Q, TANG H J. Analysis of the composite character based on double quarter wave plate [J]. Journal of Qufu Normal University, 2005, 31 (9): 65~67 (in Chinese).

[11] WANG N, LI G H. Djustment of left-hand rotation or right-hand rotation with $\lambda/4$ wave-plate [J]. Applied Optics, 1997, 22 (2): 32~34 (in Chinese).

[12] WANG W, LI G H, WANG J M. Using polarizer and wave plate transform polarization state in Stokes space [J]. Journal of Qufu Normal University, 2002, 28 (3): 64~66 (in Chinese).

[13] WANG J L, FANG Q, WANG Y Ch *et al* Two novel methods for polarization transformer using rotatable wave plates [J]. Acta Optica Sinic, 2005, 25 (1): 21~26 (in Chinese).

[14] YAN J X, WEI G H. Matrix optics [M]. Beijing: Weapons Industry Press, 1995. 184~189 (in Chinese).

在该测量中,误差来源主要由入射光的部分偏振特性、光源起伏、检测部分的非线性、衰减器衰减倍数的标定误差及步进电机的旋转误差等。其中入射光的部分偏振特性及光源起伏已经基本得到消除,整个系统的误差主要来源于衰减器衰减倍数的标定误差和步进电机的旋转累计误差。该系统中衰减器衰减倍数的标定误差小于 1%,步进电机的旋转累计误差小于 1%。故测量误差不超过 3%。

3 $S_{1, /4}$ 与 S_2 的比较及结论

比较 (7)式和 (9)式可知,线偏振光依次通过前后摆放顺序不同的 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片,其出射光的偏振态将被改变。出射光偏振态的改变量不但与入射线偏振光的偏振方向、 $\lambda/4$ 波片及 $\lambda/2$ 波片的主轴方位有关,而且与入射光通过两波片的先后顺序有关,且与通过的先后顺序有如下关系:(1)当线偏光依次通过 $\lambda/4$ 波片、 $\lambda/2$ 波片时,固定 $\lambda/4$ 波片,转动 $\lambda/2$ 波片可获得椭圆率角不变、椭圆方位角随 β 不断变化的椭圆偏振光(当 $\theta = \beta = 0$ 时为线偏光);(2)当线偏光依次通过 $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片时,固定 $\lambda/4$ 波片,转动 $\lambda/2$ 波片可得到椭圆方位角不变、椭圆率角随 β 不断变化的椭圆偏振光(当 $\theta = \beta = 0$ 时为线偏光)。

上述结论在光路调整和偏振状态的转换上有一定的参考价值。