

doi:10.3788/gzxb20174605.0526003

偏振显示及椭圆偏振光测量实验

张文静, 张志伟, 孙运强, 朱祥, 邓楠, 张彩凤, 郭鹏程, 李庆圣

(中北大学 信息与通信工程学院, 太原 030051)

摘 要:以单束正交线偏振光为光源, 利用角向偏振显示器, 采用 CCD 摄像机进行图像采集, 利用 Matlab 软件进行图像处理, 设计了一种由 He-Ne 激光器、角向偏振显示器组成的偏振光偏振方向显示系统, 并研究了其角度特性. 实验结果表明: 系统在起偏器的起偏角分别为 0° 、 90° 、 180° 、 270° 、 360° 时, 角向偏振显示器偏振显示角度的测量准确度分别为 0.480° 、 0.168° 、 0.528° 、 0.421° 、 0.340° , 测量精确度分别为 0.208° 、 0.576° 、 0.660° 、 0.603° 、 0.466° , 测量数据拟合曲线的线性相关系数为 0.999. 结合 $1/4$ 波片, 检偏器和分光比为 50:50 的分束器, 构建了椭圆偏振光测量系统, 完成了椭圆偏振光测量实验, 椭圆率为 0.198.

关键词:物理光学; 椭圆偏振光; 偏振测量; 显示功能; 图像处理; CCD 摄像机; 偏振器; 角向偏振显示器; $1/4$ 波片

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)05-0526003-7

Polarization Display and Measurement Experiment of Elliptically Polarized Beam

ZHANG Wen-jing, ZHANG Zhi-wei, SUN Yun-qiang, ZHU Xiang, DENG Nan,
ZHANG Cai-feng, GUO Peng-cheng, LI Qing-sheng

(North University of China, School of Information and Communication Engineering, Taiyuan, 030051, China)

Abstract: Using a pair of orthogonally linearly polarized beams as the light source, the azimuthally polarization axis finder, CCD cameras as image collector and Matlab software to process images, a polarization direction display system for polarized light was presented, which consisted of a He-Ne laser and an azimuthally polarization axis finder. The angle characteristics of this system were researched. The results show that the measurement accuracy is 0.480° , 0.168° , 0.528° , 0.421° and 0.340° , the measurement precision is 0.208° , 0.576° , 0.660° , 0.603° and 0.466° in the case that the polarizing angle of polarizer is 0° , 90° , 180° , 270° and 360° , respectively. By fitting a straight line to the experimental data, the linear correlation coefficient is 0.999 for this system. The elliptical polarization measurement system is constructed with a quarter-wave plate, analyzer and beam splitter with 50:50 splitting ratio. The measurement experiment of elliptically polarized light is completed, and the ellipticity of the elliptic curve is 0.198.

Key words: Physical optics; Elliptically polarized beam; Polarization measurements; Display capabilities; Image processing; CCD cameras; Polarizers; Azimuthally polarization axis finder; Quarter-wave plate

OCIS Codes: 260.5430; 260.2130; 230.5440

0 引言

偏振光是指光矢量的振动方向不变或者具有某种规则变化的光波, 是由光矢量的不均匀分布造成的. 偏

基金项目: 山西省自然科学基金(No. 2012011010-1)资助

第一作者: 张文静(1989-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为光外差通信与应用. Email: 736272126@qq.com

导师: 孙运强(1963-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为现代通信技术及应用. Email: sunyunqiang@nuc.edu.cn

通讯作者: 张志伟(1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电探测理论与技术. Email: zhangzwei@nuc.edu.cn

收稿日期: 2016-11-04; 录用日期: 2017-03-07

<http://www.photon.ac.cn>

振特性是光束的重要特征参数之一,在通信、编码^[1-2]等领域有着十分重要的应用,例如,可以利用圆偏振光干涉相移数字全息术^[3]获得高质量的数字全息图.同时,由于光束的偏振特性具有良好的方向性、相干性、高亮度等优点,因此,偏振光在科研、精密测量、物理实验和生产生活等方面具有非常广泛的应用,比如,基于偏振光定向法的完全自主导航方式^[4]、光束偏振性对显微术分辨率的影响^[5]、利用椭圆偏振光光振动大小和光电探测器测量光强的方法来验证椭圆偏振光的存在^[6-7]以及利用偏振片制作机动车前大灯和偏振片眼镜来提高机动车夜间行车安全性^[8].近年来,光束的偏振特性在激光加工领域中也备受关注,激光束的能量分布状态、脉冲频率、脉冲宽度以及激光光束偏振态的类型,都会在很大程度上影响激光加工的效果与效率^[9-11].

目前,随着偏振光研究的不断深入,偏振光在越来越多的领域得到了广泛应用.但是,对于偏振光的测量仍然具有一些缺点,例如,无法直观地显示偏振光的偏振方向,使人们难以用肉眼直接进行观察.

针对偏振光研究中存在的不足,本文利用 He-Ne 激光器(He-Ne Laser, HN)、偏振片以及角向偏振显示器(Azimuthally Polarization Axis Finder, APAF)构成偏振光偏振方向显示系统.由于线偏振光通过 1/4 波片后,出射光变为椭圆偏振光^[12].因此,利用该系统,并结合 1/4 波片(Quarter-Wave Plate, QWP),检偏器(Analyzer, AL)和分光比为 50:50 的分束器(Beam Splitter, BS),可以构建椭圆偏振光测量系统.

1 偏振显示原理

角向偏振显示器可以看作是一个线栅偏振,即由多个线型偏振器件构成的具有圆形同心传播轴的偏振器件^[13].本文提出的偏振方向显示系统中采用英国 TSI 公司生产的角向偏振显示器,来显示偏振光的偏振方向,其截面图如图 1.角向偏振显示器的每一个小区域都是一个线型偏振器,传输轴的方向垂直于径向.当线偏振光通过角向偏振显示器之后,在线偏振光的偏振方向上会出现两个相对的楔形暗区,对两个相对的楔形暗区的图像进行处理,可以获得线偏振光的振动方向.如果圆偏振光或者椭圆偏振光通过偏振显示器,那么楔形区域的强度将会明显减弱^[13].因此,利用角向偏振显示器可以直接观察到偏振光的振动方向,结合图像处理还可得到椭圆偏振光的椭圆率.

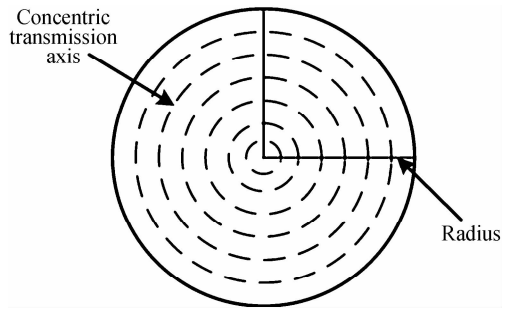


图 1 角向偏振显示器截面

Fig. 1 Cross-section of azimuthally polarization axis finder

2 偏振光偏振方向显示实验

2.1 实验装置与实验方法

偏振方向显示系统由光源(HN),型号 LPVISB-MP2 的起偏器(Polarizer, PL),两个型号为 0QBE633-5A 的平行光管(Collimating Device, CD₁)和(CD₂),角向偏振显示器,型号 HG-100V 的 CCD 摄像机(CCD Camera, CCD)以及计算机(PC)组成,实验装置见图 2.实验光源采用长春镭仕光电科技有限公司 HNR-1HT-7.0-P 型的 He-Ne 激光器,起偏器的消光比为 10000:1,两个平行光管的放大倍率均为 5 倍.

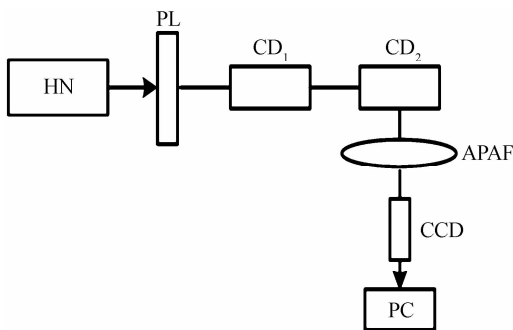
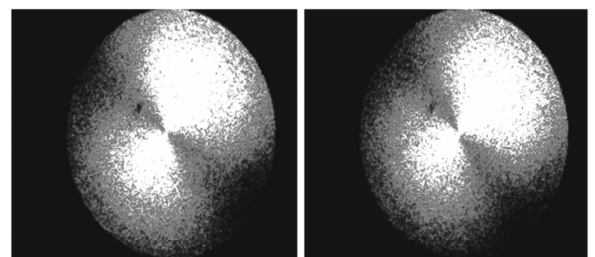


图 2 偏振方向显示系统

Fig. 2 The display system of polarization direction



(a) Reference image

(b) Rotation image

图 3 处理后的图像

Fig. 3 The processed images

激光器发出的光为一束线偏振光,沿顺时针方向旋转起偏器,使得通过起偏器的激光光强为最强,此时,起偏器的偏振方向与线偏振光的振动方向相互重合.通过起偏器的激光束依次经过两个平行光管,由于这两个平行光管都具有扩束作用,可以将通过起偏器的激光束扩束 25 倍,这样使得角向偏振显示器上的激光光斑的能量不会过于集中,也使得 CCD 摄像机所采集的图像比较清晰.经过扩束之后的激光束可以在角向偏振显示器上观察到两个相对的楔形暗区,CCD 摄像机采集所观察到的图像,并利用计算机进行处理,处理后的图像作为计算角度的基准图像,如图 3(a).之后,将起偏器继续沿顺时针方向旋转 10° ,处理后的图像作为计算角度的旋转图像,如图 3(b).

2.2 实验结果与分析

沿顺时针方向每 10° 旋转一次起偏器,用 CCD 摄像机将所采集到的图像传输到计算机,用 Matlab 软件对图像进行处理,得到每次旋转起偏器的实际转动角度,几个特殊角度的实验数据如表 1, t 为采集数据的次数,第六组为前五组数据的平均值,误差棒见图 4.

表 1 特殊角度的实验数据
Table 1 Experimental data at special angles

t \ Angle	0°	90°	180°	270°	360°
1	0.259°	90.277°	180.554°	270.954°	360.236°
2	0.347°	90.444°	179.665°	270.151°	360.004°
3	0.806°	90.880°	180.939°	269.355°	360.685°
4	0.508°	89.365°	179.853°	269.668°	359.830°
5	0.481°	89.876°	179.335°	270.026°	360.944°
6	0.480°	90.168°	180.069°	270.031°	360.340°

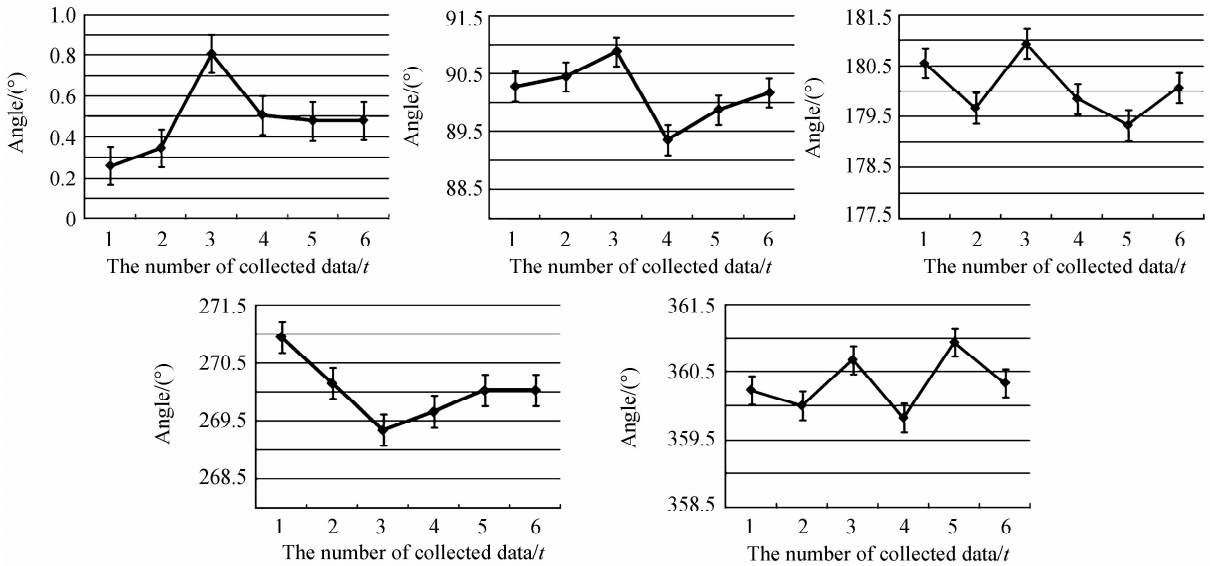


图 4 几个特殊角度的误差棒
Fig. 4 The error bar for several special angles

从表 1 可知,偏振方向显示系统在起偏器的起偏角度分别为 0° 、 90° 、 180° 、 270° 、 360° 时,由角向偏振显示器获得的偏振显示角度的测量准确度分别为 0.480° 、 0.168° 、 0.528° 、 0.421° 、 0.340° ,测量精确度分别为 0.208° 、 0.576° 、 0.660° 、 0.603° 、 0.466° .与转动角度的测量准确度与测量精确度基本吻合.起偏器的转动角度与基于角向偏振显示器并利用 Matlab 处理的转动角度之间的关系见图 5.从图 5 可以看出,起偏器的转动角度与基于角向偏振显示器的实验数据相吻合,实验结果表明,基于角向偏振显示器获得的数据拟合直线的线性相关系数 R 为 0.999.

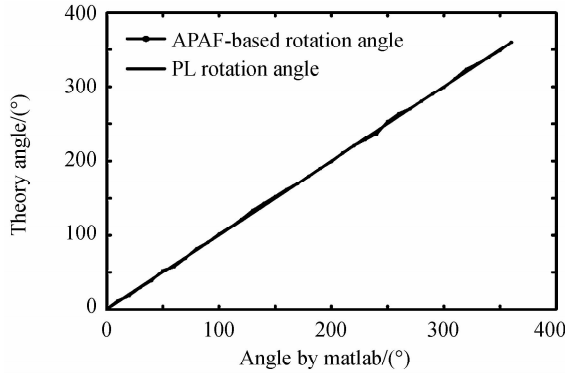


图 5 PL 的转动角度与基于 APAF 的转动角度
Fig. 5 PL rotation angle and APAF-based rotation angle

3 椭圆偏振光测量实验

3.1 实验装置与原理

椭圆偏振光的实验装置如图 6. 该实验装置是在图 2 的基础上, 在起偏器之后增加了型号为 GCM-0912M 的 1/4 波片(波长为 633nm)、型号为 LPVISB-MP2 的检偏器、型号为 CM05-BS016 的分束器和型号为 GL-3D 激光功率计(Laser Power Meter, LPM). 实验中, 光源采用长春镭仕光电科技有限公司 HNR-1HT-7.0-P 型的 He-Ne 激光器, 分束器的分光比为 50 : 50, 起偏器与检偏器的消光比为 10000 : 1, 两个平行光管的放大倍率均为 5 倍.

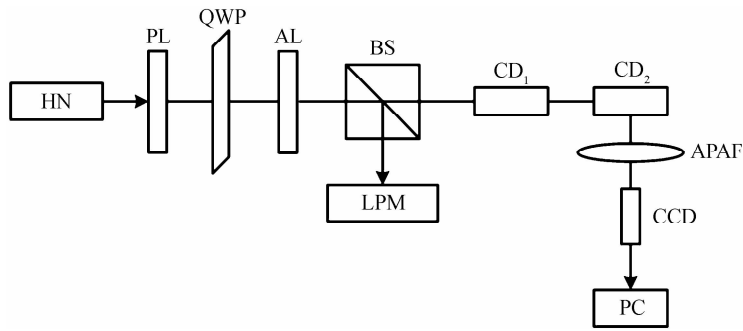


图 6 椭圆偏振光束验证系统
Fig. 6 The verification system of elliptically polarized beam

如图 6 所示, 假设 1/4 波片的光轴方向与起偏器的偏振方向的夹角为 α , 检偏器的偏振方向与 1/4 波片光轴方向的夹角为 β , 则起偏器、检偏器以及 1/4 波片之间的角度关系如图 7.

假设入射线偏振光的光强为 $2I_0$, 则线偏振光的表达式为

$$E_x = \sqrt{I_0} \sin(\omega t - kz) \quad (1)$$

$$E_y = -\sqrt{I_0} \sin(\omega t - kz) \quad (2)$$

线偏振光经过 1/4 波片之后得到的寻常光($E_o(t)$)与非寻常光($E_e(t)$)的表达式分别为

$$E_o(t) = \sqrt{I_0} \sin\alpha \sin\omega t = A_o \sin\omega t \quad (3)$$

$$E_e(t) = \sqrt{I_0} \cos\alpha \cos\omega t = A_e \cos\omega t \quad (4)$$

式中, $A_o = \sqrt{I_0} \sin\alpha$ 为寻常光的振幅, $A_e = \sqrt{I_0} \cos\alpha$ 为非寻常光的振幅. 由于 $A_o \neq A_e$ 且两者之间相位差为 $\pi/2$, 因此, 两振动的合成轨迹为一个椭圆, 即线偏振光通过 1/4 波片后, 变成椭圆偏振光, 其原理如图 8

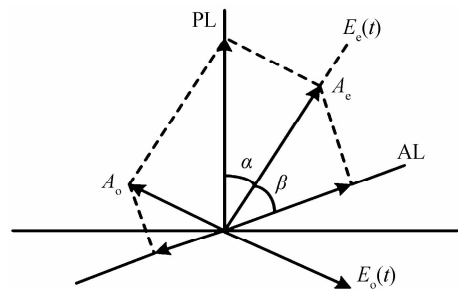


图 7 起偏器、检偏器以及 1/4 波片之间的角度关系
Fig. 7 The angle relationship between PL, AL and QWP

所示^[12].

设椭圆上沿着检偏器偏振方向的极径(光振动的大小)为 ρ ,则有^[6-7]

$$\rho = \sqrt{\frac{A_o^2 A_c^2}{A_o^2 \cos^2 \beta + A_c^2 \sin^2 \beta}} \quad (5)$$

假设通过检偏器的光强为 $2I$,那么激光功率计测得的光强为 I ,则 I 的表达式为

$$I = A_c^2 \cos^2 \beta + A_o^2 \sin^2 \beta \quad (6)$$

则由式(5)与式(6)可以得到 ρ 与 I 的关系,其表达式为^[6]

$$\rho = \sqrt{\frac{A_o^2 A_c^2}{A_o^2 + A_c^2 - I}} \quad (7)$$

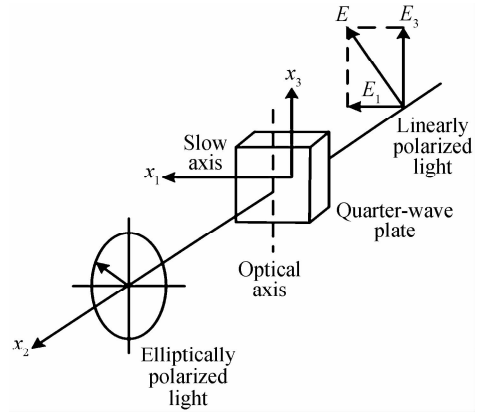


图8 线偏振光变为椭圆偏振光的原理图

Fig. 8 The schematic of linearly polarized light turn into elliptical polarized light

式中, A_o^2 与 A_c^2 分别为1/4波片中寻常光与非寻常光的光强,分别等于 $\beta=90^\circ$ 或者 $\beta=270^\circ$ 时的 I 以及 $\beta=0^\circ$ 或者 $\beta=180^\circ$ 时的 I ,实验中均取两次的平均值。

激光器发出的光为一束线偏振光,沿着顺时针方向旋转起偏器,使通过起偏器之后的线偏振光的光强最强,此时,拧紧起偏器的锁紧螺钉,以防止起偏器旋转。在起偏器之后放置检偏器,同样,沿着顺时针方向旋转检偏器,使通过检偏器后的线偏振光的光强最弱,即光强为0,此时,起偏器与检偏器处于正交状态。当通过检偏器的光强为0时,在起偏器与检偏器之间放置一个1/4波片,沿着顺时针方向旋转波片,可以观察到通过检偏器之后的光束的光强始终不为0,此时,线偏振光已经变为了椭圆偏振光。在本实验中,沿着顺时针方向旋转1/4波片,使1/4波片的光轴方向和起偏器的透光轴方向之间的夹角 α 为 30° ,此时,拧紧1/4波片的锁紧螺钉,以防止1/4波片旋转。通过分束器之后,椭圆偏振光将分为水平光束与垂直光束。水平光束依次经过平行光管,经过扩束之后的激光可以在角向偏振显示器上观察到两个相对的楔形暗区,这两个楔形区域的强度明显比线偏振光产生的楔形区域的强度弱。CCD摄像机采集图像,并传输给计算机进行图像处理。激光功率计用于测量垂直光束的光功率。

沿着顺时针方向每 10° 旋转一次检偏器,利用CCD摄像机将所采集到的图像传输到计算机,并利用matlab软件对图像进行处理,从而得到角向偏振显示器的显示角度。图9(a)、(b)、(c)、(d)和(e)分别是检偏器旋转 0° 、 90° 、 180° 、 270° 和 350° 时,CCD摄像机所采集的图像。

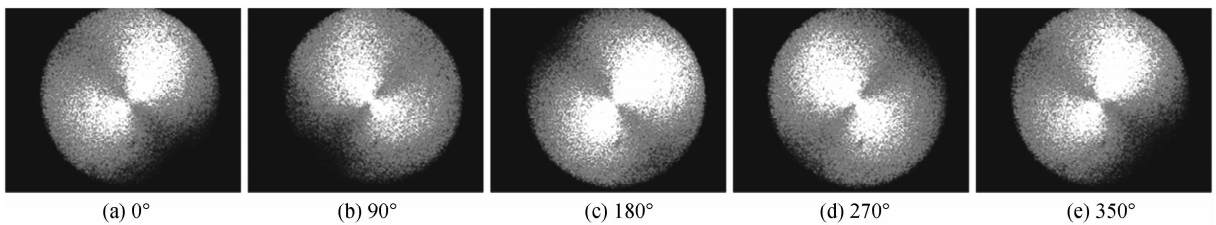


图9 CCD摄像机采集的图像

Fig. 9 The images collected by CCD

3.2 实验结果与分析

检偏器旋转一圈是 360° ,这样可以获得36组椭圆曲线的不同角度(θ)对应的光强(I),表2为不同 θ 对应的光强 I ,其中, θ_1 为检偏器的旋转角度, θ_2 为角向偏振显示器的显示角度,即matlab软件处理的角度。

利用matlab软件对表2的数据进行处理,并利用式(7),可获得角度 θ 与极径 ρ 的关系曲线,如图10所示。该曲线即为椭圆偏振光的实验曲线,其中,图10(a)为检偏器的旋转角度(θ_1)与极径 ρ 的关系曲线,图10(b)为角向偏振显示器所显示的角度(θ_2)与极径 ρ 的关系曲线。从图10中可以得出,角向偏振显示器的显示角度所对应的椭圆曲线的椭圆率^[14-15]为0.198,同时,从图10中可以看出两条椭圆曲线基本吻合。实验证明,通过偏振显示方法可以构建偏振光测量系统。

表 2 不同 θ 对应的光强 $I(\alpha=30^\circ)$ Table 2 Different θ corresponds to light intensity $I(\alpha=30^\circ)$

θ_1	θ_2	I	θ_1	θ_2	I	θ_1	θ_2	I	θ_1	θ_2	I
0°	0.739°	1.043	90°	88.185°	0.212	180°	180.296°	1.068	270°	272.845°	0.207
10°	9.825°	1.014	100°	100.916°	0.246	190°	191.075°	1.033	280°	279.476°	0.241
20°	17.292°	0.936	110°	110.212°	0.323	200°	199.668°	0.948	290°	293.230°	0.319
30°	28.302°	0.814	120°	122.454°	0.449	210°	209.633°	0.836	300°	300.743°	0.429
40°	34.638°	0.674	130°	133.032°	0.599	220°	218.785°	0.691	310°	307.934°	0.572
50°	46.830°	0.525	140°	141.747°	0.732	230°	228.836°	0.547	320°	316.553°	0.718
60°	56.432°	0.397	150°	152.592°	0.871	240°	238.388°	0.413	330°	331.902°	0.862
70°	69.681°	0.292	160°	160.523°	0.982	250°	251.147°	0.294	340°	342.068°	0.963
80°	80.941°	0.228	170°	171.476°	1.047	260°	257.470°	0.233	350°	352.777°	1.026

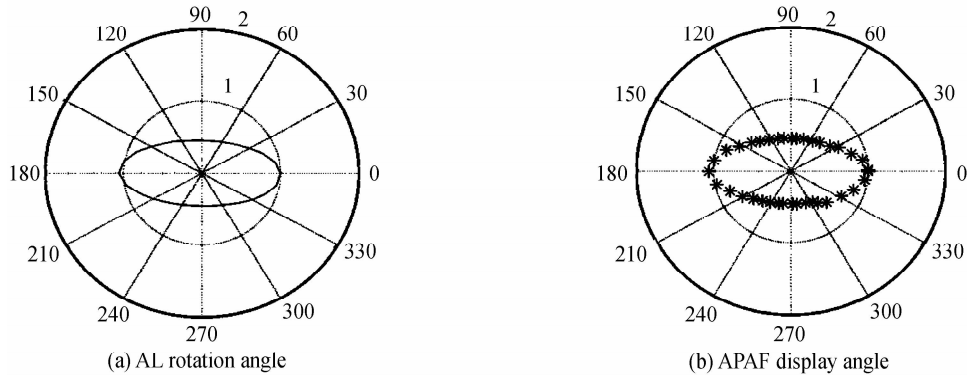


图 10 椭圆偏振光的振动轨迹曲线

Fig. 10 The vibrational trajectory curve of elliptically polarized light

4 结论

提出了一种显示偏振光偏振方向的新方法,根据角向偏振显示器(由多个线型偏振器件构成的具有圆形同心传播轴的偏振器件)的特殊结构,由 He-Ne 激光器输出的光束经过起偏器,再经过角向偏振显示器,可以观察到两个相对的楔形暗区,利用 matlab 软件对图像进行处理,可以得到起偏器旋转的角度值.同时,利用此方法可以获得椭圆偏振光的光电场 E 的矢量末端的轨迹曲线,从而可以定量地测量椭圆偏振光的椭圆率.该方法具有结构简单、可显示偏振方向等优点,为构建基于 CCD 的表面等离子体共振相位椭圆偏振法测量系统提供了一种新思路.

参考文献

- [1] YANG Hai-ma, MA Cai-wen, WANG Jian-yu, *et al.*. The transmission of polarized light of space attitude in quantum communication[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(12):1227002.
杨海马,马彩文,王建宇,等.量子光通信中偏振光空间姿态传递[J].光子学报,2015,**44**(12):1227002.
- [2] DAVIS A J, EVANS H G, MORENO I. Polarization-multiplexed diffractive optical elements with liquid-crystal displays [J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(19): 4049-4052.
- [3] ZHU Zhu-qing, LI Yang, FENG Shao-tong, *et al.*. Theoretical and experimental study on digital phase-shifting holography based on circular polarized light interference[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(4): 0409004.
朱竹青,李杨,冯少彤,等.基于圆偏振光干涉的相移数字全息术理论与实验研究[J].中国激光,2014,**41**(4): 0409004.
- [4] MA Hao, XIONG Jian, GUO Hang, *et al.*. Autonomous integrated navigation model based on atmospheric polarization characteristics [J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, **37**(2):162-167.
马号,熊剑,郭杭,等.基于大气偏振光特性辅助定向的自主导航方法[J].应用光学,2016,**37**(2): 162-167.
- [5] WEI Tong-da, ZHANG Yun-hai, XIAO Yun, *et al.*. Effects of polarization state and effective numerical aperture on the resolution in confocal total internal reflection microscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014,**51**(1): 011102.
魏通达,张运海,肖响,等.偏振态和有效数值孔径对共聚焦全内反射显微术分辨率的影响[J].激光与光电子学进展,2014,**51**(1): 011102.
- [6] HUANG Shui-ping, HU De-jing. Analysing the method for demonstrating elliptically polarized light [J]. *Physics and Engineering*, 2003, **13**(5):17-19.

- 黄水平,胡德敬. 椭圆偏振光验证方法的进一步分析[J]. 物理与工程, 2003, **13**(5):17-19.
- [7] WU Ya-ping. The method of data processing for directly demonstrating elliptically polarized light experimentally[J]. *College Physics*, 2000, **19**(7):28-29.
吴亚平. 椭圆偏振光直接实验验证的数据处理方法[J]. 大学物理, 2000, **19**(7):28-29.
- [8] OU Ying-lei. Application of polarized light in safety driving of vehicle[J]. *Physics and Engineering*, 2011, **21**(6):36-39.
欧英雷. 光的偏振特性在机动车安全驾驶中的应用[J]. 物理与工程, 2011, **21**(6):36-39.
- [9] TANG Yan-fu, NIE Zhen-wei. Study on periodic ripples on metallic surfaces induced by polarized lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(7): 0702002.
唐延甫, 聂真威. 偏振激光诱导金属表面周期条纹结构机理的研究[J]. 中国激光, 2015, **42**(7): 0702002.
- [10] IGLESIAS I, VOHNSEN B. Polarization structuring for focal volume shaping in high-resolution microscopy[J]. *Optics Communications*, 2007, **271**(1): 40-47.
- [11] KLUG U, DÜSING J F, SATO T, *et al.* Polarization converted laser beams for micromachining applications[C]. SPIE, 2010, **7590**: 759006-1-759006-8.
- [12] 石顺祥, 王学恩, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [13] HUANG Yan, YE Hong-an, GAO Lai-xu, *et al.* New method of generating vectorial polarized beams[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(4):0402004.
黄妍, 叶红安, 高来勛, 等. 矢量偏振光束产生新方法[J]. 中国激光, 2012, **39**(4): 0402004.
- [14] LI Ya-qing, WU Zhen-sen, ZHANG Yuan-yuan. Polarization characteristics for coherent beam in atmospheric a partially turbulence[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, **29**(2): 221-226.
李亚清, 吴振森, 张元元. 湍流大气中部分相干光束的偏振特性研究[J]. 电波科学学报, 2014, **29**(2): 221- 226.
- [15] GHAFARY B, ALAVINE M. Changes in the state of polarization of partially coherent flat-topped beam in turbulent atmosphere for different source conditions[J]. *Applied Physics B*, 2011, **102**(4):945-952.