文章编号:1005-4642(2025)06-0059-05

利用圆偏振器测量斯托克斯参量

张云炀^a,范峻齐^a,吴胥涵^a,万旭航^a,陈聪博^a,黄雁华^b,龚艳春^b (陆军工程大学 a. 野战工程学院; b. 基础部,江苏南京 211101)

摘 要:偏振光的产生和验证是大学物理实验必不可少的内容,实验采用偏振片、半波片和 1/4 波片等器件定性检测偏振光的偏振态. 琼斯矩阵与斯托克斯参量作为表征光偏振态的经典方法,存在操作步骤繁琐、完成实验困难等问题. 对此,本文设计了可拆装式圆偏振器. 理论推导了基于圆偏振器测量斯托克斯参量的表达式,实验定量获得了光的偏振态信息. 研究表明:设计的圆偏振器能够快速组装和定量测量光的偏振态,既保证了光通量的一致性,也减少了繁琐的操作过程,降低了测量斯托克斯参量的难度.

关键词:斯托克斯参量;偏振态;圆偏振器

中图分类号:O436.3 文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2025.06.009

偏振光的产生和验证是大学物理实验必不可 少的内容.实验采用偏振片、半波片和 1/4 波片 等器件定性检测偏振光的偏振态^[1-2].琼斯矩阵 与斯托克斯参量作为表征光的偏振态的经典方 法,适用范围存在显著差异,琼斯矩阵方法仅适用 于完全偏振光,而斯托克斯参量能够表征完全偏 振光、部分偏振光及非偏振光.实验中的光源普 遍存在部分偏振特性,斯托克斯参量方法通过光 强比的测量即可将偏振态信息转化为定量数据, 从而可以更准确地反映真实光束的偏振态^[3-4]. 因此,如何快速、有效地测量斯托克斯参量是一项 有意义的研究内容.

目前,测量斯托克斯参量的方法主要有定义 法^[5]、光强测量法^[6-8]和傅里叶级数测量法^[9-10] 等.这些方法中,有些需要组合或者分别旋转偏 振片和 1/4 波片,操作比较繁琐,实验难度较大; 有些需要在测量时增减 1/4 波片,导致不同次数 测量的光通量不同,增加了测量误差.而利用圆 偏振器测量斯托克斯参量,可以克服上述不足,保 证了光通量的一致性,在提高学生动手能力的同 时又简化了测量步骤,并降低了测量斯托克斯参 量的难度.

1 实验原理

1.1 斯托克斯参量描述光的偏振态

斯托克斯参量由 S_0 , S_1 , S_2 和 S_3 这 4 个参量 组成, 4 个参量均为光在同一时间周期内的光强 平均值,具有强度的量纲,可以通过光功率计测量 光强得到这些参量值.其中, S_0 表示水平与垂直 分量的强度之和, S_1 表示水平与垂直分量的强度 之差, S_2 表示±45°分量的强度之差, S_3 表示右旋 与左旋分量的强度之差.若 $S_3 > 0$ 则右旋分量较 强, 若 $S_3 < 0$ 则左旋分量较强.

光波 x 方向的振幅 E_{α} 、y 方向的振幅 E_{α} 、d

$$S_0 = E_{ax}^2 + E_{oy}^2$$
, $S_1 = E_{ax}^2 - E_{oy}^2$, (1)

 $S_2 = 2E_{ax}E_{oy}\cos\delta, S_3 = 2E_{ax}E_{oy}\sin\delta,$

或者表示为 x 方向、y 方向、+45°方向、-45°方 向、右旋、左旋的强度分别为 I_x , I_y , $I_{+45°}$, $I_{-45°}$, I_R , I_L ,则

$$\begin{cases} S_0 = I_x + I_y, \ S_1 = I_x - I_y, \\ S_2 = I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ}, \ S_3 = I_R - I_1. \end{cases}$$
(2)

利用式(1)和式(2)可进一步得到偏振度 P、偏振 \hat{H} 和椭偏率 β 的计算式:

收稿日期:2024-10-13;修改日期:2025-03-31

基金项目:江苏省自然科学基金项目(No. BK20211225)

作者简介:张云炀(2005-),男,江苏徐州人,陆军工程大学野战工程学院 2023 级本科生. E-mail:2752332218@qq. com

通信作者:黄雁华(1980-),男,云南宜良人,陆军工程大学基础部副教授,主要从事偏振光学研究和大学物理实验 教学工作. E-mail:huangyh0519@163.com

60

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, 0 \leqslant P \leqslant 1, \qquad (3)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right), \ -\frac{\pi}{2} \leqslant \theta \leqslant \frac{\pi}{2},$$
 (4)

$$\beta = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{S_3}{S_0}\right), \ -\frac{\pi}{4} \leqslant \beta \leqslant \frac{\pi}{4}.$$
 (5)

其中,偏振度 P=0 表示完全非偏振光,P=1 表 示完全偏振光,0 < P < 1 表示部分偏振光.建立 图 1 所示的坐标,偏振角 θ 表示光波偏振方向(或 椭圆长轴方向)与 x 轴的夹角.利用式(5)求得 β 后,再计算 tan β ,该结果可表示椭圆的短轴与长 轴之比.对线偏振光, tan $\beta=0$;对于圆偏振光, tan $\beta=1$.



图 1 斯托克斯参量的测量光路

归一化的斯托克斯参量(1, S_1/S_0 , S_2/S_0 , S_3/S_0)可以定量描述光的偏振态.例如,(1,±1, 0,0)表示水平和垂直的线偏振光,(1,0,±1,0)表 示±45°的线偏振光,(1, S_1/S_0 , S_2/S_0 ,0)表示偏 振角为任意方向的线偏振光,(1,0,0,±1)表示右 旋和左旋圆偏振光.(1,± S_1/S_0 ,0, S_3/S_0)表示 长轴方向为x轴和y轴的正椭圆,(1, S_1/S_0 , S_2/S_0 , S_3/S_0)表示偏振角为任意方向的斜椭圆.

1.2 利用圆偏振器测量斯托克斯参量

若定量描述光的偏振态,首先要测 4 个斯托 克斯参量.圆偏振器由 1/4 波片和偏振片组 成^[11-12],通过旋转和翻转圆偏振器测量 4 个斯托 克斯参量,避免了组合或者增加 1/4 波片带来的 误差.结合大学物理偏振光实验的特点,为了简 化测量过程,重新推导各量的表达式.

如图 1 所示,设入射光的斯托克斯参量为 $S = [S_0, S_1, S_2, S_3]^T$,通过某个光学装置 M 后,透射 光的斯托克斯参量为 $S' = [S_0', S_1', S_2', S_3']^T$,则 S' = MS. (6)

如图 2 所示,建立 x - y 坐标,最大透光 x 方向的偏振片和快轴在 135°的 1/4 波片组合成圆偏振器,如图 2(a)所示.圆偏振器翻转 180°后,1/4 波片的快轴方向变为 45°,如图 2(b)所示.



(b)圆偏振器翻转 180°图 2 基于圆偏振器测量光的偏振态方法

偏振片最大透光方向在 0°,1/4 波片快轴方向在 45°和 135°的穆勒矩阵分别为

旋转角度值为θ的穆勒矩阵为

$$\boldsymbol{R}(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\theta) & \sin(2\theta) & 0 \\ 0 & -\sin(2\theta) & \cos(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

如图 2(a) 所示, 当圆偏振器旋转角度 θ 后, 透 射光的斯托克斯参量为

则

如图 2(b)所示,当翻转后的圆偏振器旋转角 度 θ 后,透射光的斯托克斯参量为

$$\begin{bmatrix} S_{1,0}' \\ S_{1,1}' \\ S_{1,2}' \\ S_{1,3}' \end{bmatrix} = \mathbf{R}(-\theta) \cdot \mathbf{MP}_{0^{\circ}} \cdot \mathbf{MQ}_{45^{\circ}} \cdot \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} S_{0} \\ S_{1} \\ S_{2} \\ S_{3} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ \cos (2\theta) & 0 & 0 & -\cos (2\theta) \\ \sin (2\theta) & 0 & 0 & -\sin (2\theta) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{0} \\ S_{1} \\ S_{2} \\ S_{3} \end{bmatrix}$$

则

$$I_{\rm L}(\theta) = S_{\rm L0}' = \frac{1}{2} (S_0 - S_3). \tag{8}$$

在以往的实验中,测量 S_0 , S_1 和 S_2 较容易, 但是测量 S_3 较困难.由式(8)可以看出,通过翻 转圆偏振器, S_3 只与 S_0 有关,降低了测量 S_3 的 难度.

式(7)和式(8)对圆偏振器的任意角度均成 立,为方便测量, θ 可取特殊角,圆偏振器在旋转 0°,45°,90°和在 0°位置翻转后,利用光功率计分 别测得通过圆偏振器的光强值 I_c (0°), I_c (45°), I_c (90°)和 I_L (0°),代入式(7)和式(8)得到入射光 的斯托克斯参量为

$$\begin{cases} S_{0} = I_{C}(0^{\circ}) + I_{C}(90^{\circ}), \\ S_{1} = I_{C}(0^{\circ}) - I_{C}(90^{\circ}), \\ S_{2} = 2I_{C}(45^{\circ}) - S_{0}, \\ S_{3} = S_{0} - 2I_{L}(0^{\circ}). \end{cases}$$
(9)

2 实 验

实验主要器件为:

1)半导体激光器,光功率为4 mW,波长为 650 nm.

2)线偏振片,采用复合薄膜,型号GCL-050 003,增透波段为400~760 nm,消光比为300:1, 直径为25.4 mm.

3) 1/4 波片,采用石英多级波片,型号为 GCL-060642,工作波段为 650 nm,相位延迟准确 度为 λ/40~λ/120,直径为 25.4 mm.

4) 光功率计, THORLABS 生产的 PM400 多 点触控测量仪, 光功率范围为 100 nW~5 mW.

实验光路如图 3 所示,激光器发出的光束依 次经过偏振片、1/4 波片和圆偏振器,最后进入光 功率计.经过旋转和翻转圆偏振器,得到出射光 的光强值, S_0 , S_1 , S_2 , S_3 ,P和 θ ,实现入射光偏振 态的定量测量.



(a)实验光路图



(b)实验装置实物图图 3 实验装置

由于成品化的圆偏振器不利于学生理解圆偏 振光的产生过程,因此本文设计了可拆装式的圆 偏振器,如图4所示.波片的慢轴方向位于指针 位置,当1/4波片与偏振片夹角为45°时,固定定 位圆柱,即可得到圆偏振器.



图 4 圆偏振器的结构

基于圆偏振器搭建实验装置,测 S_0 , S_1 , S_2 和 S_3 可定量得到入射光的偏振态.实验方法为:

1) 按图 5 搭建光路,调整光路,使各器件同轴等高.

2)建立 *x*-*y* 坐标,偏振片 P₀ 的最大透光方向 设置为 *y* 方向,并作为参考方向.

3)旋转偏振片 P, 使光在白屏上消失或用光

功率计观察消光,此时 P 最大透光方向为 x 方向.

4)旋转 1/4 波片,使得再次消光. 然后将 1/4 波片迎着光方向逆时针旋转 45°,拧紧定位圆柱. 此时,偏振片和 1/4 波片连成一体,完成圆偏振器 组装[此时圆偏振器对应图 2(b)],记下当前慢轴 指针的角度,作为利用圆偏振器测量斯托克斯参 量的起始角度.

5)产生偏振光. 偏振片和 1/4 波片组合,产 生入射偏振光.

6)测量光强. 从圆偏振器起始角度开始,测量 0°时圆偏振器透射光的光强[记为 *I*_L(0)],圆偏振器翻转 180°,测量 0°,45°,90°透射光的光强 [记为 *I*_c(0°),*I*_c(45°),*I*_c(90°)].

7) 根据式(9) 计算 S_0 , S_1 , S_2 , S_3 .

基于圆偏振器测量了几种典型的偏振态:0°, 45°,90°,135°线偏振光,左旋和右旋的圆偏振光, 以及3种状态的椭圆偏振光.如表1所示,线偏 振光和圆偏振光的理论值是理想情况下的归一化 斯托克斯参量;椭圆偏振光的理论值是科研级 PAX-5710VIS 偏振计的测量值(下面简称参考 值). 光强值是通过旋转和翻转圆偏振器测量得 到的 4 次光强值. 实验值是根据式(9),结合 4 次 光强值计算得到斯托克斯参量(S_0 , S_1 , S_2 , S_3), 然后再归一化得到(1, S_1' , S_2' , S_3'),其中 $S_i' = S_i/S_0$ (i = 1, 2, 3).由于线偏振光和圆偏振光的 斯托克斯参量理论值存在 0,将 0 作为参考值无 法计算相对误差,所以在分析误差时,将测量结果 与理论值的差值除以斯托克斯参量的理论最大值 1,即 $\Delta S_i = S_i - S_i'$, i = 1, 2, 3.对于椭圆偏振光,

测量结果与参考值比较,即 $\Delta S_i = \frac{S_i - S_i'}{S_i}$.



图 5 组装圆偏振器的光路图

偏振态		S_1	S_2	S_3	$I_{\rm L}(0^\circ)$	$I_{\rm C}(0^\circ)$	$I_{\rm C}(45^\circ)$	$I_{\rm C}(90^\circ)$	$S_1{}'$	$S_2{}'$	$S_3{}'$	ΔS_i	Р	$\theta/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	a/b
线偏	0°	1	0	0	0.212	0.423	0.211	0.002	0.991	-0.007	0.002	0.6%	99.1%	-0.2	0.1	0.001
	45°	0	1	0	0.329	0.342	0.661	0.322	0.030	0.991	0.009	1.6%	99.1%	44.2	0.3	0.005
	90°	-1	0	0	0.401	0.007	0.411	0.801	-0.983	0.017	0.007	1.4%	98.3%	-0.5	0.2	0.004
	135°	0	-1	0	0.282	0.283	0.004	0.293	-0.017	-0.986	0.021	1.7%	98.6%	-44.5	0.6	0.011
圆偏	右旋	0	0	1	0.032	0.783	0.781	0.739	0.029	0.026	0.958	3.2%	95.9%	21.1	43.9	0.960
	左旋	0	0	-1	0.532	0.274	0.262	0.269	0.009	-0.035	-0.959	2.8%	96.0%	-37.6	-43.9	0.963
椭偏	状态 1	-0.386	-0.395	-0.839	0.323	0.107	0.113	0.249	-0.399	-0.365	-0.815	4.6%	97.8%	21.2	-28.2	0.536
	状态 2	-0.529	0.266	-0.815	0.809	0.218	0.569	0.691	-0.520	0.251	-0.781	3.7%	97.1%	-12.9	-26.7	0.504
	状态 3	-0.891	0.318	0.301	0.328	0.058	0.625	0.869	-0.875	0.348	0.292	4.7%	98.6%	-10.9	8.6	0.152

表 1 斯托克斯参量 $S(归-化值, S_0 = 1)$ 及光的偏振态的测量结果

如表1所示,实验测量的斯托克斯参量的误 差在可接受范围.误差来源为:

1)在激光光束传播的路径中,圆偏振器的光 具座在竖直方向可能有仰角,在水平方向可能未 通过光学中心有偏移.

2)圆偏振器的偏振片消光比较低.

3)圆偏振器中 1/4 波片的设计导致波长偏离 激光波长,或者由于 1/4 波片厚度有误差导致延 迟量有偏差等.

其中1)和2)在实验中较容易解决,下面着重 分析1/4波片的影响.

实验中,采用相同偏振片和不同1/4波片,组

成不同的圆偏振器,并检测其产生圆偏振光的能力.理论上讲,激光通过圆偏振器后,出射的光强 不变,说明产生了圆偏振光,但实际测量结果并非 如此.用3种不同1/4波片组成的圆偏振器,产 生了3种不同强度的出射光.测量方式是:在圆 偏振器出射光后面放置偏振片,在0~360°间隔 15°旋转偏振片1周,用功率计测量光强,结果如 图6所示.图6结果显示:3号1/4波片的圆偏振 器得到的数据较理想,分析原因主要是1/4波片 波材料不均匀或者1/4波片片厚度有偏差所致. 因此,在测量前应该先检查圆偏振器的性能,才能 有效较低误差.



图 6 不同 1/4 波片组成的圆偏振器的光强测量结果

3 结束语

斯托克斯参量的常规方法测量需要繁琐的操 作步骤,测量难度大.针对大学物理实验教学需 求,本文重新推导了测量斯托克斯参量的表达式, 通过组装圆偏振器实现了快速测量斯托克斯参 量.设计模块化结构的圆偏振器,不仅便于学生 自主设计与组装,还能直观展示圆偏振器的结构 和产生圆偏振光的过程.该教学装置拓展了偏振 光实验,有利于设计层次化的教学内容.

参考文献:

[1] 姚启钧. 光学教程[M]. 6版. 北京:高等教育出

版社,2019:231-247.

- [2] 董汉钱,于国萍,彭钦华.基于偏振特征的目标检测
 [J].武汉大学学报(理学版),2006,52(S1):198-202.
- [3] 王永钤,蔡履中. 用实际偏振片检测光的偏振态 [J]. 物理实验,2000,20(8):10-11,20.
- [4] 韩平丽,刘飞,邵晓鹏,等.水下偏振成像技术实验 教学化的探索[J].物理实验,2022,42(7):13-17.
- [5] 竺庆春,陈时胜. 矩阵光学导论[M]. 上海:上海科 学技术文献出版社,1991:199-203.
- [6] 程敏熙,何振江,黄佐华. 偏振光斯托克斯参量的测量和应用[J]. 红外与激光工程,2006,35(S2):109-115.
- [7] 王燕涛,姜凤贤,焦斌亮.利用斯托克斯参量验证偏振光[J].物理实验,2011,31(12):20-23.
- [8] 贺虎成.分孔径同时偏振成像光学系统的研究 [D].苏州:苏州大学,2014:23-25.
- [9] 相萌,何飘,王天宇,等. 计算偏振彩色傅里叶叠层 成像:散射光场偏振特性的复用技术[J]. 物理学 报,2024,73(12):109-118.
- [10] 刘杰,李建欣,柏财勋,等. 傅里叶变换高光谱 Mueller矩阵成像理论与方法[J].光学学报, 2020,40(7):88-97.
- [11] GOLDSTEIN D H. Polarized light [M]. Third edition. New York: CPS Press, 2010;287-291.
- [12] 罗杨洁. 偏振度曲线随折射率变化的规律研究 [J]. 测绘科学,2014,39(3):37-40.

Measuring Stokes parameters based on circular polarizer

ZHANG Yunyang^a, FAN Junqi^a, WU Xuhan^a, WAN Xuhang^a, CHEN Congbo^a, HUANG Yanhua^b, GONG Yanchun^b
(a. College of Field Engineering; b. Department of General Education, Army Engineering University of PLA, Nanjing 211101, China)

Abstract: The generation and verification of polarized light are essential components of physics experiments. The experiment uses devices such as polarizers, half-wave plates, and quarter-wave plates to qualitatively verify the polarization state of polarized light. The Jones matrix and Stokes parameters, as classical methods for characterizing the polarization state of light, have issues such as complex operational steps and difficulties in completing the experiment. In response to the problems a modular circular polarizer was designed. Theoretical expressions for measuring Stokes parameters based on the circular polarizer were derived, and experimental studies were conducted to quantitatively obtain information about the polarization state of light. The research indicated that the circular polarizer could be rapidly assembled and could quantitatively measure the polarization state of light, reducing complex operational processes and lowering the difficulty of obtaining Stokes parameters.

Key words: Stokes parameters; polarization state; circular polarizer [编辑:任德香]