

光偏振特性的定量研究

贾久峰 庄仲红

(邵阳学院理学院, 湖南 邵阳 422000)

摘要 光具有频率(光谱)、光强、位相和偏振四维属性,人眼对光的偏振特性并不敏感,需借助仪器测量来获知偏振信息,偏振的相关测量涉及强度测量。本文采用经典法、琼斯矩阵法和干涉法定量计算不同类型偏振光通过偏振片后的光强,导出线偏振光、椭圆偏振光和圆偏振光通过偏振片后的光强与偏振片透振方向的定量关系;并通过实验验证理论计算结果,建立偏振特性与光强的定量联系,深入分析波片和偏振片旋转对光强的影响。

关键词 光的偏振;光强;琼斯矢量;偏振光干涉

QUANTITATIVE STUDY ON POLARIZATION CHARACTERISTICS OF LIGHT

JIA Jiufeng ZHUANG Zhonghong

(Department of Science, Shaoyang University, Shaoyang, Hunan 422000)

Abstract Light has four-dimensional properties of frequency (spectrum), intensity, phase, and polarization. The human eye is not sensitive to the polarization of light, so instruments are needed to measure polarization information, which involves intensity measurement. In this paper, the classical method, Jones matrix method, and interferometric method are adopted to quantify the light intensity of different types of polarized light passing through a polarizer, and to derive the quantitative relationship between the light intensity of linearly polarized light, elliptically polarized light and circularly polarized light passing through a polarizer and the direction of the polarizer transmittance. The theoretical calculation results are verified by experiments to establish a quantitative connection between polarization characteristics and light intensity, and the effects of the rotation of waveplates and polarizer on the light intensity are analyzed in depth.

Key words polarized light; light intensity; Jones matrix; polarization interference

光不仅能传递能量,还是信息的载体,光学技术为人们的生活和生产提供了很多帮助。通过对光的偏振性质的研究使人们对于光的传播和与物质的相互作用规律有了更深刻的理解。光的偏振

特性研究,在科研、医学和工业等领域具有使用价值和研究意义。在传统光学成像的基础上增加偏振光的信息可提高目标成像效果,如应用于人体组织进行无损检测和成像^[1,2]、水果内部病虫害检

收稿日期: 2023-10-19

作者简介: 贾久峰,邵阳学院理学院讲师,2582601843@qq.com。

引文格式: 贾久峰,庄仲红. 光偏振特性的定量研究[J]. 物理与工程, 2024, 34(6): 136-142.

Cite this article: JIA J F, ZHUANG Z H. Quantitative study on polarization characteristics of light[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(6): 136-142. (in Chinese)

测,以及国防海陆空的观测、侦察与对抗^[3]。近年来,通过对光场偏振分布的空间调制,形成了一类新型的光束——矢量光束^[4],作为光场调控研究的热点之一,在非线性光学、激光微加工、超分辨显微等领域发挥着巨大作用^[5],其光学效应和应用如光针、超分辨成像、光学微操纵、飞秒微加工。光的偏振在光纤通信系统中也起着重要的作用^[6],如偏分复用技术使通信容量增加,采用两个偏振组合进行编码即偏振编码。

我们的眼睛对光的亮度和颜色敏感,而对光的偏振不敏感,初步学习光的偏振时,感觉概念和理论抽象难理解;此外大学物理实验中关于偏振的部分一般也只有检验光束的偏振态以及验证马吕斯定律等,对偏振光类型判断时,往往先入为主地观察打在屏上的光的形状,缺乏检偏器对其入射偏振光亮度影响的关联。本文从理论上采用经典法、琼斯矩阵法和干涉法定量计算不同类型偏振光的光强受偏振片的影响,并通过实验验证理论计算结果,将偏振概念与光强定量联系,正确认知偏振的同时为光的偏振特性深入研究提供理论基础。

1 偏振光经检偏器透射光强的理论计算

本文中偏振光经过偏振片的光强分析的光路图如图1所示。光所经过的介质均为均匀介质,为便于分析,偏振片为理想器件,采用不同的理论方法计算光强。

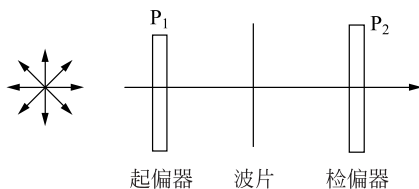


图1 光路图

1.1 经典法

在直角坐标系下,检偏器 P_2 的透振方向为 $\mathbf{n}_0 = \cos\alpha \mathbf{i} + \sin\alpha \mathbf{j}$, t 时刻入射到 P_2 的光矢量 $\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} = E(\cos\varphi \mathbf{i} + \sin\varphi \mathbf{j})$, φ 为光矢量与 x 轴所成的角,则光矢量 $\mathbf{E}$ 在透振方向的分量为 $E_a = \mathbf{E} \cdot \mathbf{n}_0$ 。光强是能流密度平均值,测量光强意味着在仪器的响应时间 τ 内能流密度对时间平均值,当 τ 远小于周期 T 时,可在周期 T 内求平均

值。若入射光为线偏振光,其光矢量的大小为 $\mathbf{E} = A \cos(\omega t + \varphi_0)$, A 为光矢量振幅,光矢量 $\mathbf{E}$ 与透振方向 $\mathbf{n}_0$ 所成的角为 θ ,则线偏振光通过检偏器后的光强

$$I = \frac{C}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} E_a^2 dt = \frac{C}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [A \cos(\omega t + \varphi_0) \cos\theta]^2 dt \\ = \frac{CA^2}{2} \cos^2\theta = I_0 \cos^2\theta,$$

其中, $I_0 = \frac{CA^2}{2}$, 其中 $C = v\epsilon = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}$, 光在介质中的传播速度 v , 光波所在介质的介电常数 ϵ 和磁导率 μ 均与介质有关^[7], 有些教材中为便于描述光强的变化,往往令 $C/2$ 取值为 1 以及入射光的振幅进行归一化处理^[8]。后面光强计算式若未出现 C , 则令 $C/2=1$ 。

光在不同介质中传播时,界面处的反射和介质对光的吸收,使得振幅有所改变,本文关注偏振片处于不同角度时的光强,为便于分析及减少振幅的标记,理论计算中振幅均采用相对振幅。

若入射光为椭圆偏振光时,沿 z 轴方向传播的椭圆偏振光,在 $z=z_0$ 平面内,光矢量可写为 $\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j}$, 其中 $E_x = A_x \cos(\omega t - kz_0)$, $E_y = A_y \cos(\omega t - kz_0 + \delta)$ 。其中, δ 为 y 方向的振动超前于 x 方向的相位。

$E_a = \mathbf{E} \cdot \mathbf{n}_0 = E_x \cos\alpha + E_y \sin\alpha$ 。以正椭圆 $\delta = \pm\pi/2$ 为例进行计算,椭圆偏振光通过检偏器后的光强

$$I = \frac{C}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} E_a^2 dt = \frac{C(A_x^2 + A_y^2)}{2} \frac{[1 + \cos 2\alpha \cos 2\theta_1]}{2} \\ = \frac{I_0}{2} [1 + \cos 2\alpha \cos 2\theta_1] \quad (1)$$

其中, $\cos\theta_1 = \frac{A_x}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}$, $\sin\theta_1 = \frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}$,

$$I_0 = \frac{C(A_x^2 + A_y^2)}{2}。$$

由式(1)可知:椭圆偏振光的透射光强不仅与振幅平方成正比,而且与椭圆的振幅比角 θ_1 和偏振片的透振方向有关。因此不可以将简谐波波强 $I = A^2$ 和单色简谐平面电磁波透射波强 $I = A^2 \cos^2\theta$ 的关系式直接推广到椭圆偏振光,使得椭圆偏振光光强分析较复杂。

当入射光为圆偏振光时,令椭圆偏振光中的 $A_x = A_y = A$, 则 $A_x^2 + A_y^2 = 2A^2$, $I_0 = CA^2$ 。圆偏

振光通过检偏器后的光强

$$\begin{aligned} I &= \frac{C}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} E_a^2 dt \\ &= \frac{C}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[A \cos(\omega t - kz_0) \cos\alpha + \right. \\ &\quad \left. A \cos\left(\omega t - kz_0 \pm \frac{\pi}{2}\right) \sin\alpha \right]^2 dt \end{aligned}$$

化简整理得

$$I = \frac{CA^2}{2} = \frac{I_0}{2} \quad (2)$$

透射光的光强与 P_2 的透振方向无关, 旋转 P_2 透射光的光强不变。这是由于一个周期内圆偏振光的光矢量在 xy 平面内分布具有圆对称, 由于偏振片的作用使得圆偏振光一半吸收一半透过。

1.2 琼斯矩阵法

用矩阵^[9-12]描述光的偏振态及其变换, 不仅形式简洁, 而且便于计算, 尤其可以方便得出由偏振器件组成复杂系统的出射光的最后状态。描述偏振态的琼斯矢量采用复数形式。光矢量也采用复数表示, 光矢量在 x, y 坐标轴的分量分别为 $E_x =$

$$\tilde{E}_x e^{-i\omega t}, E_y = \tilde{E}_y e^{-i\omega t}, \text{琼斯矢量表示为 } E = \begin{pmatrix} \tilde{E}_x \\ \tilde{E}_y \end{pmatrix}。$$

设起偏器 P_1 的透振方向为 x 轴, 检偏器 P_2 的透振方向与 x 轴成 α 角, 其琼斯矩阵为

$$\begin{pmatrix} \cos^2\alpha & \cos\alpha\sin\alpha \\ \cos\alpha\sin\alpha & \sin^2\alpha \end{pmatrix}$$

t 时刻入射到 P_2 的线偏振光 $E = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j}$, 与 x 轴的夹角为 β , 其归一化的琼斯矢量为 $E = \begin{pmatrix} \cos\beta \\ \sin\beta \end{pmatrix}$, 线偏振光经 P_2 后, 出射光的琼斯矢量为

$$\begin{aligned} E' &= \begin{pmatrix} \cos^2\alpha & \cos\alpha\sin\alpha \\ \cos\alpha\sin\alpha & \sin^2\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta \\ \sin\beta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos^2\alpha\cos\beta + \cos\alpha\sin\alpha\sin\beta \\ \cos\alpha\sin\alpha\cos\beta + \sin^2\alpha\sin\beta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

偏振光的强度

$$I = |\tilde{E}_x|^2 + |\tilde{E}_y|^2 = \tilde{E}_x \tilde{E}_x^* + \tilde{E}_y \tilde{E}_y^*$$

则出射光的光强

$$\begin{aligned} I &= I_0 [(\cos^2\alpha\cos\beta + \cos\alpha\sin\alpha\sin\beta)^2 + \\ &\quad (\cos\alpha\sin\alpha\cos\beta + \sin^2\alpha\sin\beta)^2] \end{aligned}$$

化简整理得

$$I = I_0 \cos^2(\alpha - \beta) = I_0 \cos^2\theta$$

其中, θ 为光矢量 E 与 P_2 透振方向 n_0 所成的角,

结果与经典法的一致。

为便于计算, 将椭圆偏振光的分析放在后面, 这里仅分析入射光为圆偏振光时, 出射光的光强。圆偏振光 $E_x = A \cos(\omega t - kz_0), E_y = A \cos(\omega t - kz_0 \pm \pi/2)$, 令 $\delta = \pm \pi/2, \varphi = \omega t - kz_0, E = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \pm i \end{pmatrix}$, 负号表示右旋圆偏振光, 正号表示左旋圆偏振光。圆偏振光经 P_2 后, 出射光的琼斯矢量为

$$\begin{aligned} E' &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos^2\alpha & \cos\alpha\sin\alpha \\ \cos\alpha\sin\alpha & \sin^2\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \pm i \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos^2\alpha \pm i\cos\alpha\sin\alpha \\ \cos\alpha\sin\alpha \pm i\sin^2\alpha \end{pmatrix} \end{aligned}$$

则出射光的光强

$$\begin{aligned} I &= \frac{I_0}{2} (\cos^4\alpha + \cos^2\alpha\sin^2\alpha + \cos^2\alpha\sin^2\alpha + \sin^4\alpha) \\ &= \frac{I_0}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

圆偏振光从检偏器的出射光强与 P_2 透振方向 α 角无关, 即旋转 P_2 光强不变; 此外, 光强与圆偏振光的左旋、右旋无关, 后面对圆偏振光和椭圆偏振光的光强分析不再区别左旋、右旋。

1.3 干涉法

一束线偏振光正入射到波片后分解成 e 光和 o 光, 它们振动方向垂直, 频率相同, 传播方向相同, 在波片中的传播速度不同。从波片出射后, 仍保持振动方向垂直, 频率相同, 但有一定的相位差, 与波片厚度有关, 这两束光一般合成为一束椭圆偏振光, 此偏振光通过检偏器 P_2 , 可看作 e 光和 o 光在 P_2 透振方向分量的叠加, 这两个分量满足干涉条件, 可利用相干波的叠加结果计算出射光的光强。

波片光轴方向与线偏振光的光矢夹角 θ_1, P_2, P_1 透振方向夹角为 α , 椭圆偏振光的 e 光和 o 光可表示为

$$\begin{aligned} E_o &= A_o \cos(\omega t - kz_0), E_e = A_e \cos(\omega t - kz_0 + \delta) \\ \text{为便于计算波片为 } 1/4 \text{ 波片, 相位差 } \delta &= \pi/2, \varphi = \omega t - kz_0, A'_o = A_o \sin(\alpha - \theta_1), A'_e = A_e \cos(\alpha - \theta_1), \\ A_e &= A \cos\theta_1, A_o = A \sin\theta_1, \text{有} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A'^2 &= A'^2_o + A'^2_e + 2A'_o A'_e \cos \frac{\pi}{2} \\ &= A'^2_o + A'^2_e = \frac{1}{2} A^2 [1 + \cos 2\theta_1 \cos 2(\alpha - \theta_1)] \end{aligned} \quad (4)$$

$$I = \frac{I_0}{2} [1 + \cos 2\theta_1 \cos 2(\alpha - \theta_1)] \quad (5)$$

若选取光轴为 x 轴, 检偏器 P_2 与 x 轴的夹角为 $\alpha - \theta_1$, 式(5)与式(1)等价。

其中圆偏振光 $A_o = A_e$, $\theta_1 = \pi/4$ 则

$$I = I_0 [\cos^2 \theta_1 \cos^2 (\alpha - \theta_1) + \sin^2 \theta_1 \sin^2 (\alpha - \theta_1)] \\ = \frac{I_0}{2} \quad (6)$$

此式与式(2)、式(3)相同。

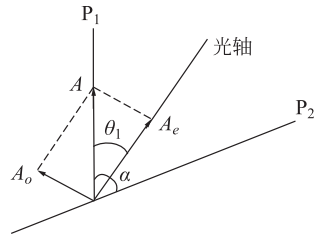


图2 光矢量和波片光轴示意图

综上所述: 利用经典法求线偏振光通过偏振片的透射光强较琼斯矩阵法简单, 利用琼斯矩阵法, 便于确定线偏振光经多个光学偏振件后的偏振态, 在确定光轴方向的前提下, 利用干涉法求椭圆偏振光或圆偏振光通过偏振片后的光强较其他简单, 同时也便于干涉现象的研究。下面对线偏振光通过 $1/4$ 波片和 $1/2$ 波片, 偏振态的影响及经检偏器出射光光强的定量研究。

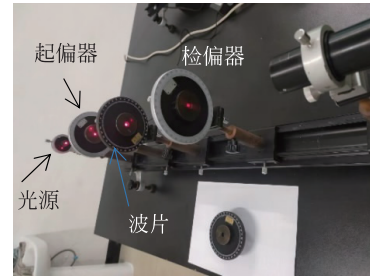
2 线偏振光通过波片偏振特性的研究

实验装置图如图3所示。实验中通过调节起偏器 P_1 , 选取合适的光强, 然后 P_1 保持不动, 因此可选 P_1 的透振方向为 x 轴, 其垂直方向为 y 轴, 实验中 P_1 与 P_2 正交位置比透振方向平行的位置容易确定, 故 P_2 的透振方向的改变均在正交基础偏离角度, 偏离角为 θ_2 , $\theta_2 = \alpha + \pi/2$ 。实验中光强的测量以光电接收器的电流数值体现。理论计算中的 I_0 的数值通过实验测量的最大值来获知。

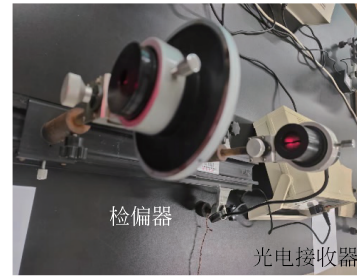
2.1 线偏振光通过 $1/4$ 波片偏振特性的研究

设起偏器 P_1 的透振方向为 x 轴, $1/4$ 波片快轴与 x 轴成 θ_1 角, 其琼斯矩阵为

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_1 & e^{i\frac{\pi}{2}} \sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & -e^{i\frac{\pi}{2}} \cos \theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta_1 + i \sin^2 \theta_1 & (1-i) \cos \theta_1 \sin \theta_1 \\ (1-i) \cos \theta_1 \sin \theta_1 & \sin^2 \theta_1 + i \cos^2 \theta_1 \end{pmatrix}$$



(a)



(b)



(c)

图3 线偏振光通过波片偏振特性研究实验装置

(a) 图中光路为由左向右; (b) 图(a)图中右端光路的接收端; (c) 图为偏振光测试仪

则从波片出射的

$$E' = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta_1 + i \sin^2 \theta_1 & (1-i) \cos \theta_1 \sin \theta_1 \\ (1-i) \cos \theta_1 \sin \theta_1 & \sin^2 \theta_1 + i \cos^2 \theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta_1 + i \sin^2 \theta_1 \\ (1-i) \cos \theta_1 \sin \theta_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{E}_x \\ \tilde{E}_y \end{pmatrix}$$

$\tilde{E}_a = \tilde{E}_x \cos \alpha + \tilde{E}_y \sin \alpha$, 则

$$I = I_0 [|(\cos^2 \theta_1 + i \sin^2 \theta_1) \cos \alpha|^2 + | (1-i) \cos \theta_1 \sin \theta_1 \sin \alpha |^2] \\ = \frac{I_0}{2} [1 + \cos 2(\alpha - \theta_1) \cos 2\theta_1]$$

$$\text{即 } I = \frac{I_0}{2} [1 - \cos 2(\theta_2 - \theta_1) \cos 2\theta_1] \quad (7)$$

此式与式(1)、式(5)等价。

调节 P_2 使 P_1 和 P_2 正交, 再插入 $1/4$ 波片, 旋转波片使光强最小, 此时光轴方向与 P_1 透振方

向相同, $\theta_1 = 0^\circ$, 并在 θ_1 处于 $0^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 时, 将 P_2 每隔 5° 记录数据, 旋转一周, 光强如图 4 所示, 图中散点为实验数据, 实线为对应角度时理论函数图像。

由图 4 可知: 当 θ_1 取不同数值时从 $1/4$ 波片透射光的偏振状态不同, $\theta_1 = 0$ 时, 出现消光现象, 光强随 P_2 旋转角度的 θ_2 变化规律为 $I = I_0 \cos^2\left(\theta_2 + \frac{\pi}{2}\right)$, 与线偏振随 θ_2 的变化相吻合, 为线偏振光; 当 θ_1 为 $20^\circ, 30^\circ$ 时无消光, 光强随 P_2 旋转发生变化, 且与椭圆偏振光理论计算结果吻合, 为椭圆偏振光; 当 $\theta_1 = 45^\circ$ 时光强不变, 为圆偏振光。实验数据与理论结果吻合。 $0 \leq \theta_1 < 45^\circ$ 时, 光强的最大值和最小值均随着 θ_1 变化, 最大值随 θ_1 增加而减小, 最小值随 θ_1 增加而增加, 但极值之和 $I_{\max} + I_{\min}$, 为固定值, 与 θ_1 无关; 光强极值对应的角度与 θ_1 相关, 偏离值为 θ_1 , 由式(7)可得, 当 $\theta_2 = \theta_1 + \pi/2, \theta_1 + 3\pi/2$ 时, 光强取极大值, $I_{\max} = \frac{I_0}{2}(1 + \cos 2\theta_1)$; 当 $\theta_2 = \theta_1, \theta_1 + \pi$ 时, 光强为极小值, $I_{\min} = \frac{I_0}{2}(1 - \cos 2\theta_1)$; 理论和实验一致。由以上定量分析可知: 线偏振光经 $1/4$ 波片透射光的偏振类型较多, 通过调控 $1/4$ 波片的光轴方向可获得不同偏振态的椭圆偏振光。在光纤通信系统中, $1/4$ 波片、 $1/2$ 波片、 $1/4$ 波片组合成偏振控制器, 可将一任意的偏振态转化另一任意的偏振态, 即通过调整这三个波片的光轴角度, 输出偏振态可以覆盖整个庞加莱球。

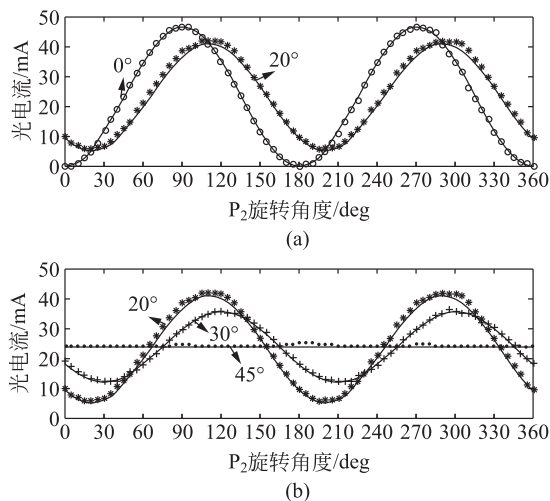


图 4 $1/4$ 波片在不同角度时的光强

2.2 线偏振光通过 $1/2$ 波片偏振特性的研究

设起偏器 P_1 的透振方向为 x 轴, $1/2$ 波片快轴与 x 轴成 θ_1 角, 其琼斯矩阵为

$$\begin{pmatrix} \cos\theta_1 & e^{i\pi}\sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 & -e^{i\pi}\cos\theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \cos^2\theta_1 - \sin^2\theta_1 & 2\cos\theta_1\sin\theta_1 \\ 2\cos\theta_1\sin\theta_1 & \sin^2\theta_1 - \cos^2\theta_1 \end{pmatrix}$$

则从波片出射的光

$$E' = \begin{pmatrix} \cos^2\theta_1 - \sin^2\theta_1 & 2\cos\theta_1\sin\theta_1 \\ 2\cos\theta_1\sin\theta_1 & \sin^2\theta_1 - \cos^2\theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \cos 2\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \end{pmatrix}$$

出射光仍为线偏振光, 但偏振方向与入射前不同, 由原来的 0° 变为 $2\theta_1$ 。

$$I = I_0 \cos^2(2\theta_1 - \alpha) = I_0 \cos^2 2(\theta_1 - \theta_2) \quad (8)$$

调节 P_2 使 P_1 和 P_2 正交, 再插入 $1/2$ 波片, 旋转波片使光强最小, 此时光轴方向与 P_1 透振方向相同, $\theta_1 = 0^\circ$, 并在 θ_1 处于 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 时, 将 P_2 每隔 15° 记录数据, 旋转一周, 光强如图 5 所示, 图中散点为实验数据, 实线为对应角度时理论函数图像。

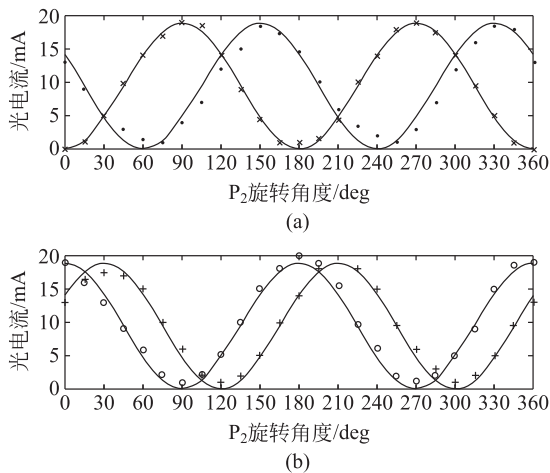


图 5 $1/2$ 波片在不同角度时的光强

(a) 符号 $\times$: 0° , 符号 $\bullet$: 30° ; (b) 符号 $\circ$: 45° , 符号 $+$: 60°

由图 5 可知, 实验数据与理论函数曲线匹配。当 θ_1 取不同数值时, 光强随 P_2 旋转角度的 θ_2 变化规律具有相似性, 周期为 π , 光强最大值不变, 与 θ_1 无关。将 $\theta_1 = 0^\circ$ 的光强变化曲线分别向右平移 $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$, 与 $\theta_1 = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 的变化曲线重合。 P_2 旋转一周均出现两次光强最强, 两次消

光, 1/2 波片不改变线偏振光的偏振类型, 但光强变化曲线发生平移, 偏振状态发生变化。光强的极值位置随 θ_1 平移了 $2\theta_1$, 则线偏振光的光矢量方向随 θ_1 偏转了 $2\theta_1$ 角。根据以上特性, 将偏振分束器与 1/2 波片相结合, 输出两束相关联但偏振方向可控的线偏振光, 例如, 在光隔离器^[6]中, 法拉第旋光器(旋光角为 45°)和 1/2 波片(光轴的方位与垂直方向夹角为 22.5°)结合可将水平偏振的 o 光调控为垂直偏振的 o 光, 通过法拉第旋光器和 1/2 波片的组合改变光的偏振方向实现光束单向传输。

2.3 旋转 1/4 波片或 1/2 波片通过检偏器的光强研究

起偏器 P_1 与检偏器 P_2 满足正交 $\alpha = \pi/2$, 线偏振光经 1/4 波片后, 从 P_2 出射的光强

$$I_1 = \frac{I_0}{2} [1 + \cos 2\theta_1 \cos 2(\alpha - \theta_1)] = \frac{I_0}{2} (1 - \cos 4\theta_1) \quad (9)$$

线偏振光经 1/2 波片后, 从 P_2 出射的光强

$$I_2 = I_0 \cos^2(2\theta_1 - \alpha) = \frac{I_0}{2} (1 - \cos 4\theta_1) \quad (10)$$

P_1 和 P_2 正交时分别旋转 1/2 波片和 1/4 波片一周记录光强变化, 如图 5 所示。由图 6 可知: 光强随波片角度 θ_1 的变化周期为 $\pi/2$, 与图 3 和图 4 中曲线周期 π 不同, 旋转波片一周, 出现四次光强最大, 四次消光。无论是 1/2 波片还是 1/4 波片, 当 θ_1 满足 $\pi/4$ 的奇数倍时, 光强具有最大值, 由前面干涉法求光强可知, 此时对应 e 光和 o 光在 P_2 透振方向分量的干涉相长; 当 θ_1 满足 $\pi/4$ 的偶数倍时, 光强取值最小值, 且消光, 为干涉相

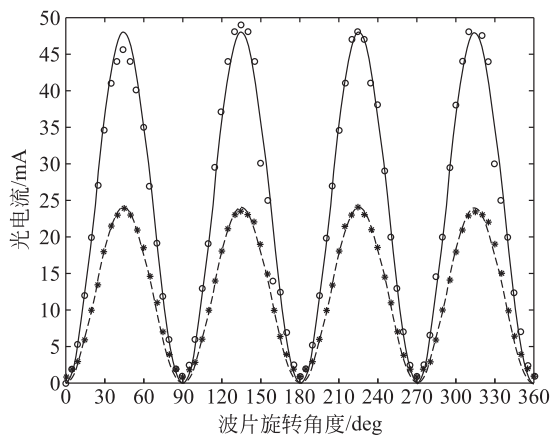


图 6 P_1 和 P_2 正交时, 旋转波片的光强

○: 1/2 波片, * : 1/4 波片

消。1/2 波片和 1/4 波片使得 e 光和 o 光的相位差不同, 因此干涉相长时的光强值不同, 1/2 波片对的光强最大值是 1/4 波片的两倍。以上光强变化特点为偏光显微镜的工作原理, 将双折射或旋光标本放入载物台, 由于它们的介入对原线偏振光产生影响, 每旋转载物台一周, 会有四次明暗变化, 用来检测生物体内某些有序结构和某些组织中的化学成分, 通过增加标本中各向同性细节和各向异性细节之间的对比度则更能凸显标本的特性, 例如, 当神经纤维组织被切断的短时间内, 利用偏振光能观察到神经纤维的形变信息, 而自然光无法显示此信息^[13]。

3 结语

根据光强的物理概念, 结合偏振片的二向色性定量计算不同类型偏振光在检偏器作用下强度的变化; 将偏振器件对偏振光的影响用琼斯矩阵表示和偏振态采用矩阵描述——琼斯矢量, 利用矩阵的数学运算获知最终的偏振态, 从而得出光强的计算表示式, 将经典物理概念和规律与简洁的数学矩阵语言衔接, 拓展抽象思维; 通过分析线偏振光在波片中传播的物理本质, 利用干涉法计算光强, 省略了一些繁杂的数学运算, 扩展了干涉的应用领域。采用不同的方法计算光强, 拓展了问题处理的方法。将理论结果与实验数据进行比较, 验证理论分析的正确性, 为光偏振理论应用于生活、科研、医学和工业等领域提供理论基础。

参 考 文 献

- [1] BERTOLOTI J, VAN PUTTEN EG, BLUM C, et al. Noninvasive imaging through opaque scattering layers[J]. Nature, 2012, 491(7423): 232-4.
- [2] 蒋啸宇, 曾楠, 何永红, 等. 基于旋转偏振角的线偏振扫描成像方法研究[J]. 生物化学与生物物理进展, 2007, 34(6): 659-663.
JIANG X Y, ZENG N, HE Y H, et al. Investigation of linear polarization difference imaging based on rotation of incident and backscattered polarization angles[J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 2007, 34(6): 659-663. (in Chinese)
- [3] 姜会林, 付强, 段锦, 等. 外偏振成像探测技术及应用研究[J]. 红外技术, 2014, 36(5): 345-349.
JIANG H L, FU Q, DUAN J, et al. Research on infrared polarization imaging detection technology and application

- [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(5): 345-349. (in Chinese)
- [4] ZHAN Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 1-57.
- [5] 齐淑霞, 刘圣, 李鹏, 等. 光场偏振分布测量方法及其应用(特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(8): 0851502.
- QI S X, LIU S, LI P, et al. Measurement methods on polarization distribution of light fields and their applications(invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(8): 0851502. (in Chinese)
- [6] 张晓光, 席丽霞, 崔楠, 等. 光纤通信系统中的偏振光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2023.
- ZHANG X G, XI L X, CUI N, et al. Polarized optics in fiber communication systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2023. (in Chinese)
- [7] 崔宏滨, 李永平, 康学亮. 光学[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- CUI H B, LI Y P, KANG X L. Optics[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [8] 郭永康. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- GUO Y K. Optics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005. (in Chinese)
- [9] 何启浩. 矩阵光学中的琼斯矩阵方法与其在偏振光中的应用[J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2014, 40(5): 772-775.
- HE Q H. Method of Jones matrix of matrix optics and its application in polarized light[J]. *Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2014, 40(5): 772-775. (in Chinese)
- [10] 王薇, 谢宇, 许璐璐. 偏振光经过 1/4 波片后偏振态的变化[J]. *淮北煤炭师范学院学报(自然科学版)*, 2010, 31(2): 26-29.
- WANG W, XIE Y, XU L L. Research on change of the polarization status for the polarized light passing through quarter wave plate[J]. *Journal of Huaibei Coal Industry Teachers College (Natural Science)*, 2010, 31(2): 26-29. (in Chinese)
- [11] 张晓光, 席丽霞, 崔楠, 等. 偏振表象和偏振表象变换理论及应用[J]. *大学物理*, 2023, 42(5): 1-8.
- ZHANG X G, XI L X, CUI N, et al. Theory of polarization representation, representation transformation and their applications[J]. *College Physics*, 2023, 42(5): 1-8. (in Chinese)
- [12] 王政平, 余龙. 完全偏振光在圆/椭圆基矢下的表征及其光矢轨迹做图法[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0526001.
- WANG Z P, YU L. Expression of totally polarized light employing circular and elliptic basis vector and method of locus plotting of optical vector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0526001. (in Chinese)
- [13] 江键, 屈学民, 邓玲, 等. 医用物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- JIANG J, QU X M, DENG L, et al. Medical physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013. (in Chinese)