

Theoretical Analysis of Rotating Polarization-Analyzer for Polarized Light and Its Application in Photoelectric Effect Experiment

Dangbo Liu^{1,2*}, Changchun Ning^{3*}, Haixiang Gao¹, Yifan Gao¹, Chunming Gu¹

¹Department of Astronomy, School of Physical and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

²Shanghai Key Laboratory for Particle Physics and Cosmology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

³Department of Physics, College of Science, Tibet University, Lhasa Tibet
Email: *dbliu@sjtu.edu.cn, *24305041@qq.com

Received: Feb. 6th, 2018; accepted: Feb. 20th, 2018; published: Feb. 27th, 2018

Abstract

We developed innovative polarization analyzer and used it in the photoelectric effect experiment. We give a detailed analysis of innovative rotating polarization analyzer, and calculate the distribution curves of the emergent intensity of emitting light. The analyzer was rotated by a mini-motor and polarization beam was returned to electric signal then to a computer by a photoelectric behind it. A BBO crystal was used and its 1/4 wave voltage is about 1200 V. The experimental and simulated results are in good agreement with each other and show that this method is effective. A key point is that we can determine the orientation of the light axis of a crystal.

Keywords

Rotating Polarization Analyzer, Marius's Law, Interference of Polarized Light, 8 Shape of Polarized Light

旋转检偏技术的理论分析及其在电光效应实验中应用

刘当波^{1,2*}, 宁长春^{3*}, 高海翔¹, 高轶凡¹, 顾春明¹

¹上海交通大学 物理与天文学院 天文系, 上海

*通讯作者。

文章引用: 刘当波, 宁长春, 高海翔, 高轶凡, 顾春明. 旋转检偏技术的理论分析及其在电光效应实验中应用[J]. 现代物理, 2018, 8(1): 8-17. DOI: 10.12677/mp.2018.81002

²上海交通大学 上海粒子物理和宇宙学重点实验室, 上海

³西藏大学 理学院 物理系, 西藏 拉萨

Email: ^{*}dbliu@sjtu.edu.cn, ^{*}24305041@qq.com

收稿日期: 2018年2月6日; 录用日期: 2018年2月20日; 发布日期: 2018年2月27日

摘要

在偏振光实验中, 测得出射偏振光强与偏振片旋转角的关系曲线为闭合8字型。本文提出了一种新型的旋转检偏技术, 对旋转检偏技术给出理论分析和计算, 并应用于电光效应实验中。在电光效应实验中, 出射光的偏振特性与施加于电光晶体的电压, 晶体与偏振片的摆放位置有关。在实验中采用BBO电光晶体, 半波电压约1200 V, 实验结果和理论分析吻合, 并且从实验结果定出未知晶体的光轴的取向。

关键词

偏振光, 马吕斯定律, 偏振光干涉, 8字型偏振光图像

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光是一种电磁横波, 光波的电场矢量 $\mathbf{E}$ 和磁场矢量 $\mathbf{B}$ 的振动方向相垂直, 且分别与波的传播方向垂直。光矢量的振动方向对于波的传播方向这种不对称性称为偏振, 是区别于纵波的最显著的特性。光在传播过程中, 在垂直于传播方向的平面内, 光矢量可能有不同振动状态, 例如光矢量 $\mathbf{E}$ 始终在某一方向振动, 也可以随时改变方向, 甚至绕传播方向以光频率旋转, 光矢量的这种振动状态称为光的偏振态。按照偏振状态不同, 可将光分为线(平面)偏振光、椭圆偏振光、圆偏振光(以光矢量的末端轨迹图形为依据), 线偏振光和圆偏振光可看作椭圆偏振光在某种条件下的特例[1] [2] [3]。另外, 部分偏振光和自然光可以看作这三种偏振光中的叠加。光的偏振区别于光的其它性质, 近年来利用光的偏振特性所研发的偏振光器件及技术对现代科技的进步发挥了重要作用, 已被人们广泛应用于各个领域, 如影视、导航器、运输安全、医疗、电流传感器和精密测量等。显然, 光的偏振的测量、分析与调控对研制偏振光仪器和技术, 以及对物质光学特性的分析起着重要的作用[4] [5]。现在人们对偏振光的理论分析及偏振光的调制的实现方面做出一些可行具体工作, 并做成各种器件, 应用于各个领域包括天文观测领域[6] [7] [8] [9]。本文中我们提出一种新型的旋转检偏技术, 给出了旋转检偏的理论分析和计算, 并应用于电光效应实验中。本文安排如下: 第二节简介旋转检偏理论和理论计算; 第三节为实验设计思路; 第四节介绍实验装置及步骤; 第五节给出试验结果及数据分析处理; 最后给出本文总结。

2. 旋转检偏理论简介

2.1. 椭圆偏振光的起偏

一束单色平行光经起偏装置后射出的平面偏振光垂直入射到光轴平行于表面、厚度均匀的晶体上, 如图1所示[2]。

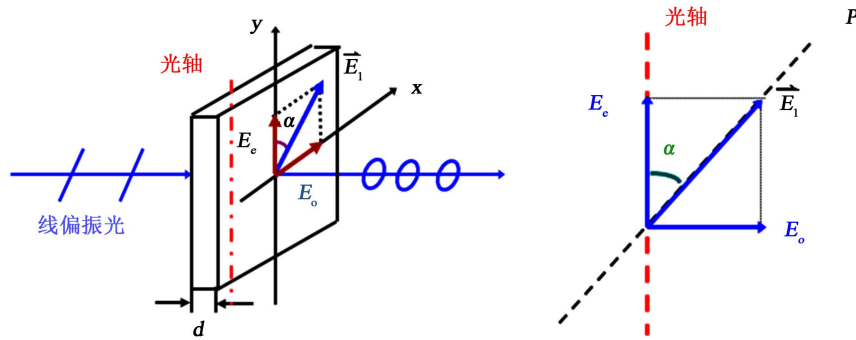


Figure 1. The polarization of elliptically (circularly) polarized light
图 1. 椭圆(圆)偏振光的起偏

如果以虚线(即y轴)表示晶体的光轴,入射平面偏振光的振幅为 E_1 , 强度为 I_1 , 其振动方向和光轴成 α , 则平面偏振光进入晶体后, 将分成两个振动方向互相垂直的o光和e光, 振幅分别为:

$$E_o = E_1 \sin \alpha, \quad E_e = E_1 \cos \alpha.$$

由于o光和e光在晶体中的传播速度不同, 所以随着在晶体中路程的增加, 同位相入射到晶体的两束光的位相差也逐渐增大。如果以 n_o 和 n_e 分别表示o光和e光的主折射率, 以 d 表示晶体的厚度, 以 λ 表示入射平面偏振光的波长, 则经过晶体后, o光和e光的位相差是[1] [2] [3]

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d \quad (1)$$

由于o光和e光是两个同频率、有固定位相差、互相垂直的振动, 设分别在x, y方向, 其振动方程可写成:

$$E_x = E_o \cos \omega t, \quad E_y = E_e \cos(\omega t + \delta)$$

合成振动的轨迹方程为:

$$\frac{E_x^2}{E_o^2} + \frac{E_y^2}{E_e^2} - \frac{2E_x E_y}{E_o E_e} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (2)$$

上式为椭圆方程的一般表达式[2], 即合成振动的末端的轨迹在与传播方向垂直的平面内呈椭圆形状。它与以 $E_x = \pm E_o$, $E_y = \pm E_e$ 为界的矩形相内切, 不过其主轴可以是倾斜的。主轴究竟朝哪一边倾斜, 以及是左旋还是右旋, 与 δ 取值(在哪一象限)有关。对于不同厚度 d 的晶体, o光和e光的位相差是不同的, 从晶体出射的o光和e光合成振动的末端在与传播方向垂直的平面内所描绘出的轨迹形状也各不相同。射出晶体之外后两光束速度恢复到一样, 合成一般得到椭圆偏振光($\delta = \pm \pi/2$, 相对光轴为正椭圆), 但在一定条件下可成为圆偏振光($\delta = \pm \pi/2, \alpha = 45^\circ$)或仍为线偏振光($\delta = 0$ 或者 π ; $E_o = 0$ 或 $E_e = 0$ 即 $\alpha = 0^\circ$ 或 90°) [2]。

2.2. 偏振光的干涉及旋转检偏

平面偏振光通过晶体后, 分成2个振动方向互相垂直的o光和e光, 虽然从晶体波片出射的两束光在空间没有分开, 但它们之间是有位相差 δ 的。由于它们的振动方向不同, 不满足相干条件, 因而不产生干涉现象。如果把它们振动分解到同一方向, 便可以在这个方向上产生干涉。因此, 平面偏振光通过晶体后, 另再加一个检偏器(偏振片), 便可使o光和e光沿检偏器偏振化方向(透光方向)的振动分量具有相干性[1] [2] [3]。

图2(a)和图2(b)中的 P_1 , P_2 分别表示起偏器和检偏器的偏振化方向, 如图所示, P_1 和 P_2 间的夹角为 β , P_1 和 P_2 与晶体波片的夹角分别为 α 和 $\beta - \alpha$, 图2(a)和图2(b)分别表示 $0 < \beta - \alpha < \pi/2$ 和 $\pi/2 < \beta - \alpha < \pi$ 两种情况, 则o光和e光在 P_2 方向上的分量的振幅分别为:

$$E_{o2} = \begin{cases} E_o \sin(\beta - \alpha) = E_1 \sin \alpha \sin(\beta - \alpha), & 0 < \beta - \alpha < \pi/2, \\ E_o \sin[\pi - (\beta - \alpha)] = E_1 \sin \alpha \sin(\beta - \alpha), & \pi/2 < \beta - \alpha < \pi. \end{cases} \quad (3)$$

$$E_{e2} = \begin{cases} E_e \cos(\beta - \alpha) = E_1 \cos \alpha \cos(\beta - \alpha), & 0 < \beta - \alpha < \pi/2, \\ E_e \cos[\pi - (\beta - \alpha)] = -E_1 \cos \alpha \cos(\beta - \alpha), & \pi/2 < \beta - \alpha < \pi. \end{cases} \quad (4)$$

最后从偏振片 P_2 射出的光线, 其强度应为 E_{o2} 和 E_{e2} 这两个同方向振动相干叠加的结果。设分振动 E_{o2} 和 E_{e2} 的合振动为 E_2 , 即

$$E_2 = E_{o2} + E_{e2}. \quad (5)$$

此两束光对应的分振动的位相差为[2]:

$$\delta_{\text{出}} = \delta_{\lambda} + \delta + \delta_{\text{投}} \quad (6)$$

其中 δ_{λ} 表示入射在晶体波片上的线偏振光的o, e投影分量间的相位差, δ 表示在晶体波片传播o光和e光产生的位相差(即式(1)), $\delta_{\text{投}}$ 表示o光和e光对 P_2 轴投影引起的位相差, 则根据同方向同频率简谐振动合成的原理, 合振动 E_2 的振幅为[2] [10]

$$E_2 = \sqrt{E_{o2}^2 + E_{e2}^2 + 2E_{o2}E_{e2}\cos\delta_{\text{出}}} \quad (7)$$

由于入射到晶体波片的光总是线偏振光, 入射线偏振光对o轴, e轴投影分量间的相位差 $\delta_{\lambda} = 0$ 或 π , 在本文的讨论可假定 $\delta_{\lambda} = 0$ (即认为初始入射到波片的o光和e光的分振动皆沿o轴和e轴的正向), 故不予考虑。 δ 的取值取决于晶体波片的厚度 d 、入射光波长 λ 以及o光和e光的主折射率差 $n_o - n_e$ 。图2(a)中o轴和e轴的正向对 P_2 轴的两个投影分量方向相反, 则 $\delta_{\text{投}} = \pi$; 图2(b)中两个投影分量方向一致, 则 $\delta_{\text{投}} = 0$ 。故从偏振片 P_2 射出的两束光对应的分振动的位相差为

$$\delta_{\text{出}} = \delta_{\lambda} + \delta + \delta_{\text{投}} = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d + \begin{cases} \pi, & 0 < \beta - \alpha < \pi/2, \\ 0, & \pi/2 < \beta - \alpha < \pi. \end{cases} \quad (8)$$

从而从偏振片 P_2 出射光线的(相对)强度为

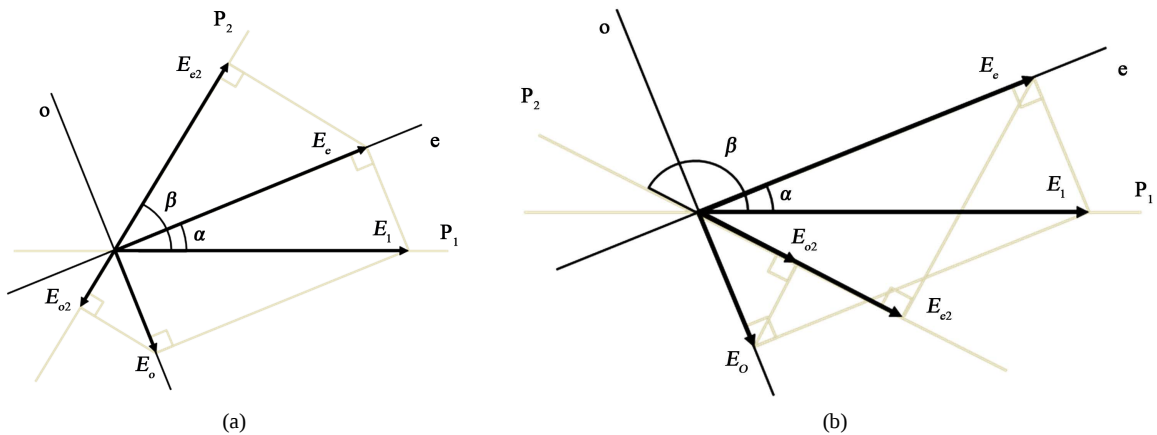


Figure 2. Interference of the polarized light; The resolution and composition of the electric field vector
图 2. 偏振光的相干, 电矢量的分解与合成

$$\begin{aligned}
\frac{I_2}{I_1} &= \frac{E_2^2}{E_1^2} = \frac{E_{o2}^2 + E_{e2}^2 + 2E_{o2}E_{e2}\cos\delta_{\text{出}}}{E_1^2} \\
&= \sin^2\alpha\sin^2(\beta-\alpha) + \cos^2\alpha\cos^2(\beta-\alpha) \\
&\quad - 2\sin\alpha\sin(\beta-\alpha)\cos\alpha\cos(\beta-\alpha)\cos\delta \\
&= \cos^2(\beta-2\alpha) - \sin 2\alpha\sin(2\beta-2\alpha)\cos^2(\delta/2) \\
&= \cos^2\beta + \sin 2\alpha\sin(2\beta-2\alpha)\sin^2(\delta/2)
\end{aligned} \tag{9}$$

上式即为从偏振片 P_2 出射光线的(相对)强度, 公式中的两个等式等价, 在此列出便于接下来讨论晶体波片为半波片的出射强度轨迹。

利用公式(9), 我们以四分之一晶体为例画出从偏振片 P_2 出射光线的(相对入射线偏振光)强度的图形, 分别取不同的对应不同 α 值(即固定偏振片 P_1 与晶体波片的夹角), 偏转偏振片 P_2 即改变 P_1 和 P_2 间的夹角 β , 得到出射光强分布的轨迹以极坐标系表示, 如图 3 所示, 轨迹曲线直观地再现了平面偏振光、椭圆偏振光和圆偏振光经过检偏器后的光强分布。实验结果表明, 光强随角度的分布不是椭圆, 而是呈“8”字形状的轨迹, 有一个“腰”存在。平面偏振光(椭率最大)“腰”的宽度为零, 随着椭率的减小, “腰”的宽度逐渐增大。当变为圆偏振光时, 光强随角度的分布呈圆形(见文献[10])。轨迹曲线表明, 椭圆偏振光的椭圆轨迹的长轴取向与 α 有关。从实验理论上可知 α 从 $0^\circ \sim 45^\circ \sim 90^\circ \sim 135^\circ \sim 180^\circ$ 的变化过程中, 偏振光轨迹是按直线 - 椭圆 - 圆 - 椭圆 - 直线 - 椭圆 - 圆 - 椭圆 - 直线的规律变化, 且“8”字形状的轨迹沿逆时针方向旋转。从理论出射光强轨迹曲线, 可以指导我们给出晶体波片的光轴的取向。 α 在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 和 $135^\circ \sim 180^\circ$ 变化范围, “8”字形状的轨迹长段对称轴即为光轴, α 在 $45^\circ \sim 135^\circ$ 范围内“8”字形状的轨迹“腰”的对称线方向为光轴取向, 亦即我们通过电光实验偏转偏振片 P_2 可以找出晶体波片的光轴取向。

另外, 我们给出一特例: 如果晶体波片为半波片即 $\delta = \pi$, 则出射光为线偏振光, 经过偏振片 P_2 , 出射光的轨迹图象“8”字形状轨迹的“腰”的宽度皆为零(如可从公式(9)中含有 $\cos^2(\delta/2)$ 的表达式分析得出), 因为线偏振光经半波片认为线偏振光, 相对光轴转过 2α 角, 出射“8”字形状的轨迹沿逆时针方向旋转, 且“8”字形状轨迹的长轴与极轴(沿极角 0° 方向)的夹角的角平分线恰为晶体波片光轴的取向(图 4)。

3. 实验设计思路

大学物理实验中的偏光实验(或马吕斯实验)是通过手动旋转检偏器, 用光电探测器记录下旋转角度和光电流的对应关系, 然后在极坐标系下画出类似8字型的角度光强关系图[10] [11] [12] [13] [14], 本文中的理论模拟分析可以对实验结果作出合理的解释。基于上述理论分析, 从光在偏光实验基础上我们提出一种新型的旋转检偏技术, 并应用于电光效应实验中。

既然实验中线偏振光画出闭合8字型曲线, 椭圆偏振光是不闭合的8字型, 圆光为O型, 这样, 根据测得的曲线形状便可以知道入射光是线, 圆, 椭圆偏振光。当然, 如果要区分自然光与圆偏振光, 部分偏振光和椭圆偏振光还是需要加四分之一波片的。问题是如果设计一个包括上述内容在内的偏光特性实验, 仅仅依靠手工测量, 还是费时费力的, 这也是目前没有这个实验的原因之一。

综合上述分析和考虑, 我们研制了新型检偏仪。特点是: 用一个小电机带动检偏器旋转, 在检偏器后面放置一个光电探测器, 采集数据并且数字化后通过USB口直接输入计算机, 利用绘图软件可给出实时的出射相对光强测量曲线。在电光效应实验中, 当调节电光晶体(我们使用的是BBO晶体)的电压时, 折射率差随之改变, 输出光的偏振特性也会随之变化, 使用我们研制的新型检偏仪能够实时观察并记录下这些变化, 丰富了实验内容, 帮助学生了解和掌握光的偏振特性, 马吕斯定律和电光效应等概念, 实验中用到的新手段有别于传统实验, 有利于开拓学生视野。

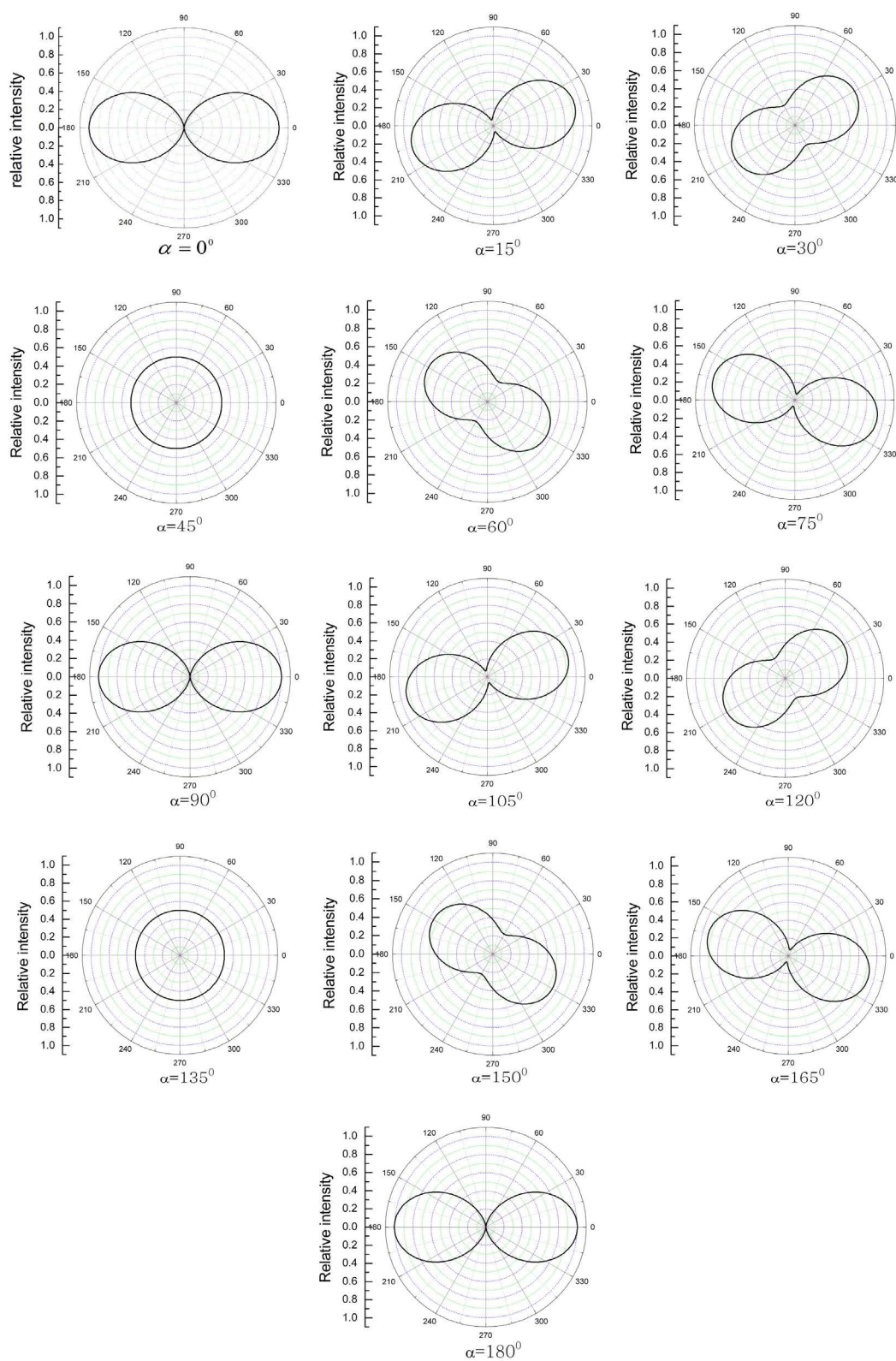


Figure 3. For quarter-wave plate, the tracing curves of the emergent light intensity relative to the incident polarized light under different angle α

图 3. 对于四分之一波片, 不同 α 角时出射相对光强的轨迹曲线

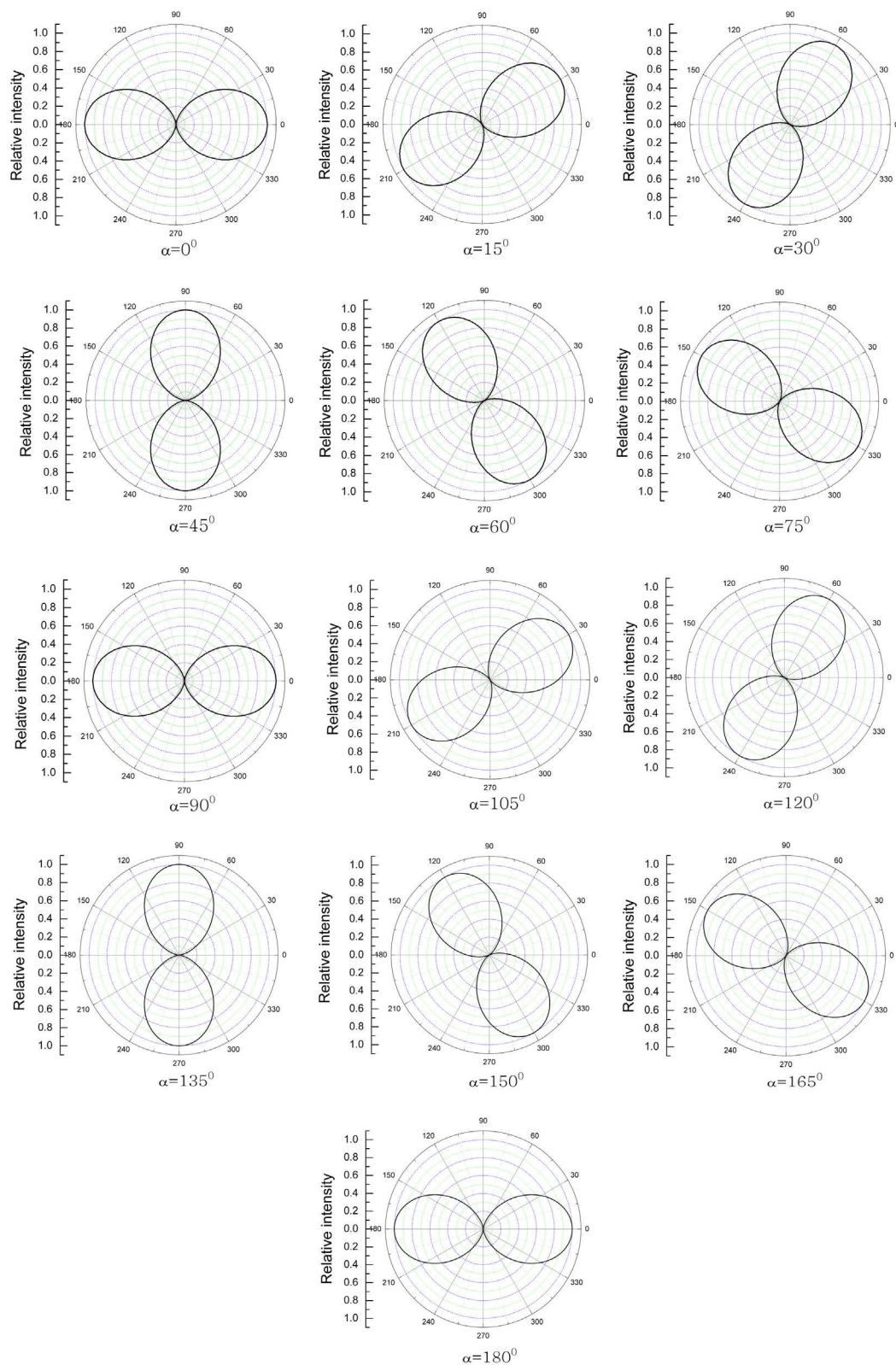


Figure 4. For half-wave plate, the tracing curves of the emergent light intensity relative to the incident polarized light under different angle α

图 4. 对于半波片, 不同 α 角时出射相对光强的轨迹曲线

4. 实验装置及步骤

- 1) 实验装置: 图 5 是实验装置图, 左边是传统的电光实验装置, P_1 和 P_2 分别为起偏器和检偏器, 我们采用的 BBO 电光晶体半波电压 1200 V。我们改进研制了偏光检测装置, 其尺寸约 $10 \times 6 \times 4$ cm, 内置的检偏器(偏振片)转速为 5 转/秒, 硅光电池探测, 数字化后输入计算机, 每半圈绘图一次画出实验曲线。
- 2) 实验步骤: 首先调整光路与电光实验相同, 当 $P_1 \perp P_2$, 调整到出现均匀对称的十字衍射条纹为止, 然后接入旋转检偏系统, 打开数据处理软件, 实验准备工作就绪可进行旋转偏光实验。

5. 实验内容与实验结果

实验一: 线偏光的检测。 P_2 出射的是线偏振光, 接收到的是闭合的 8 字型曲线如图 6(a)所示。旋转 P_2 , 线光的偏振面随之改变, 接收到的 8 字型曲线实时检测到这种变化, 图 6(b)是模拟结果, 图 6(c)是还原结果。

实验二: 椭圆偏振光实验。移开 P_2 , 晶体出射的是椭圆偏振光, 接收到的是不闭合的 8 字型曲线。这时改变晶体电压, 椭圆光的长短轴的大小和方向将随之变化, 图 7 是实验结果[15]。

实验三、圆偏振光实验, 调整晶体电压和入射光偏振面与晶体光轴夹角以获得圆偏振光, 结果如图 8 所示。

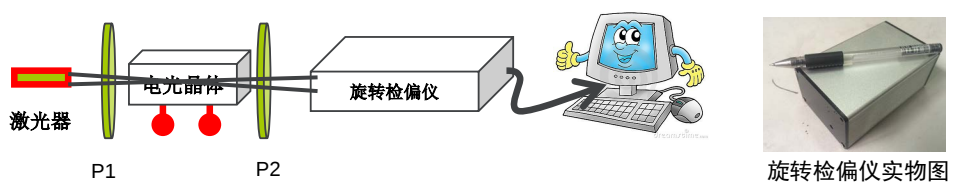


Figure 5. Schematic diagram of the experiment set-up
图 5. 装置原理简化图

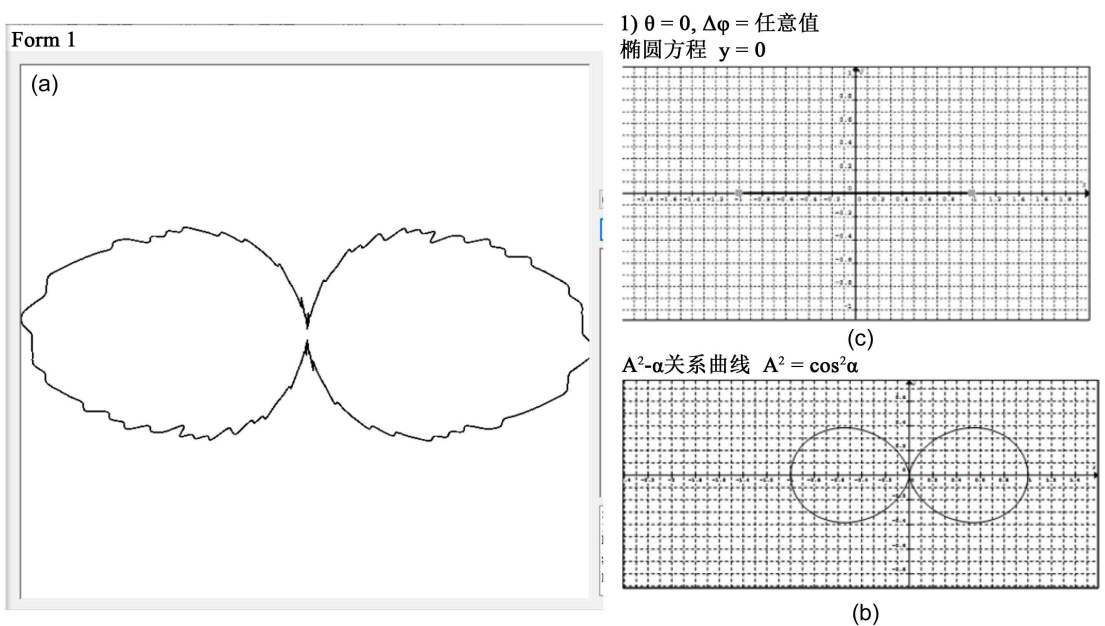


Figure 6. Experimental results of linearly polarized light: (a) Experimental curve; (b) Simulated curve; (c) Reductive result
图 6. 线偏振光实验结果: (a) 实验曲线; (b) 模拟曲线; (c) 还原结果

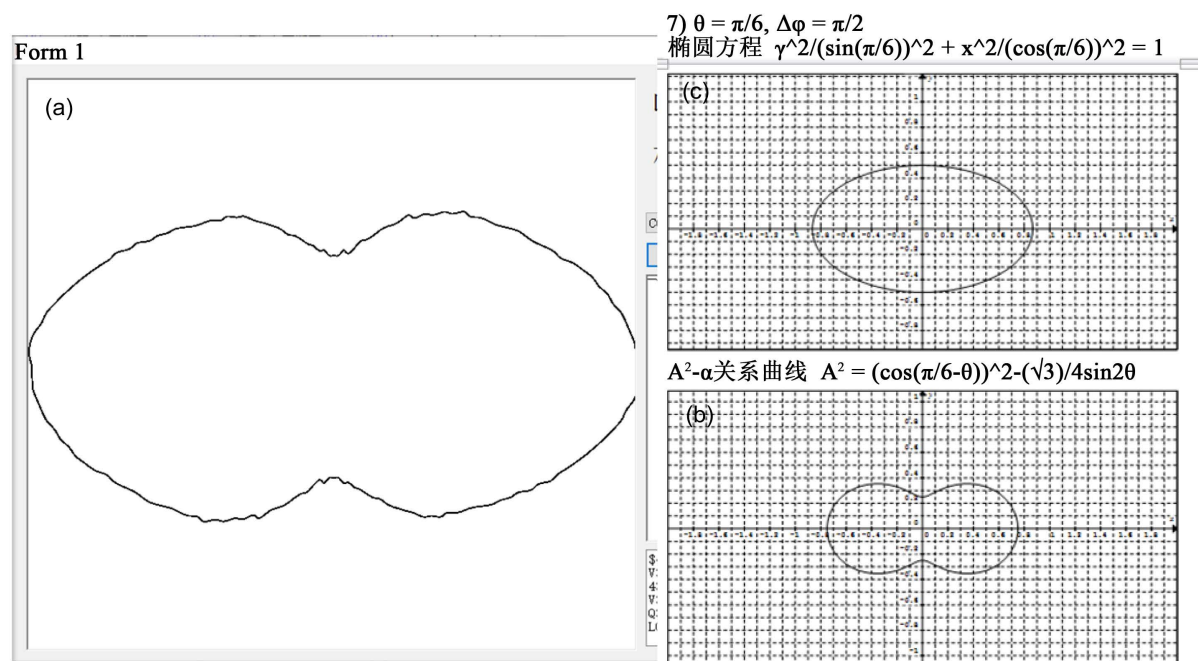


Figure 7. Experimental results of elliptically polarized light: (a) Experimental curve; (b) Simulated curve; (c) Reductive result
图 7. 椭圆偏振光实验结果: (a) 实验曲线; (b) 模拟曲线; (c) 还原结果

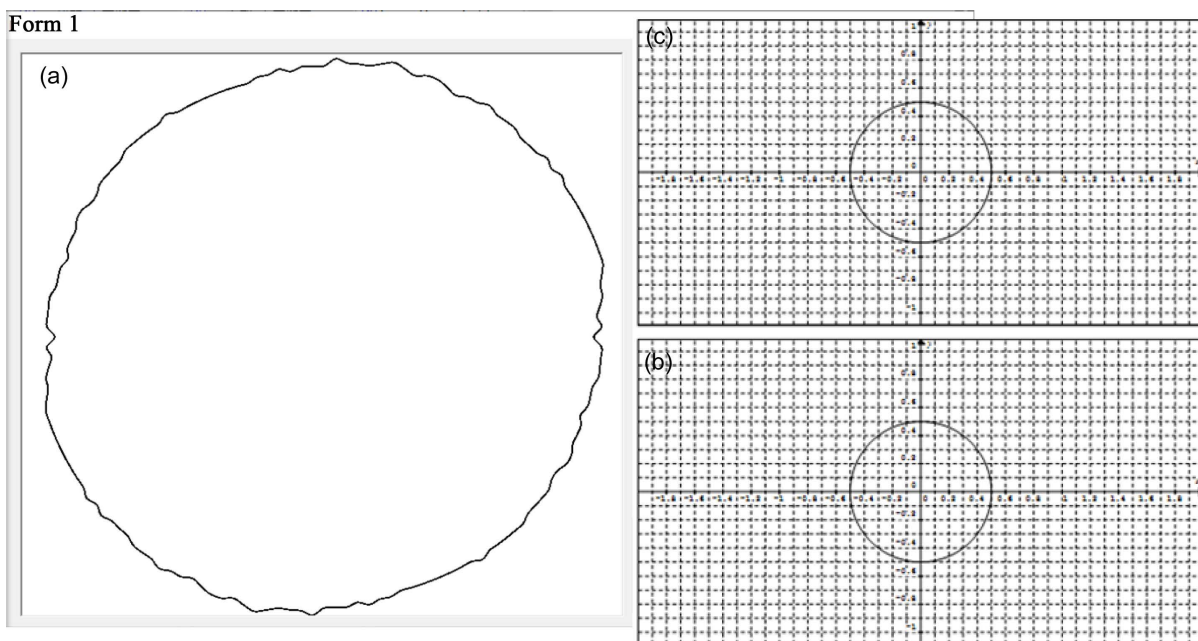


Figure 8. Experimental results of circularly polarized light: (a) Experimental curve; (b) Simulated curve; (c) Reductive result
图 8. 圆偏振光实验结果: (a) 实验曲线; (b) 模拟曲线; (c) 还原结果

6. 结论

本文对旋转偏振技术进行比较详细的理论讨论, 实验中线偏振光通过波片后通过偏振片出射光的轨迹图象为“8”字形轨迹, 便于区别线偏振光, 椭圆偏振光和圆偏振光, 并可以从出射光的“8”字形轨迹定出波片的光轴取向, 与理论分析符合一致。基于本文的理论分析, 从光在偏光实验基础上本文研

制了一种新型的旋转检偏技术，并应用于电光效应实验中。实验给出了旋转检偏仪对线偏振光、椭圆偏振光和圆偏振光(四分之一波长电压)等偏振光的测量结果，并对实验数据进行了模拟和还原，实验结果和理论分析吻合，且从实验结果定出晶体波片未知光轴的取向。

在本文的实验中，我们证明采用我们研制的旋转检偏仪，略去了普通实验所用的手动旋转偏振片并读数的步骤，使结果更精确，实验更快捷，节省了大量人力及时间。我们继续将优化我们的实验装置和读数系统，及误差的校正，使我们的旋转检偏仪先用于大学物理和物理实验的教学，拓展学生视野，并争取将我们的新型检偏仪和旋转偏正应用于使用偏振光器件的其它领域，如导航器、运输装置、天空偏振光观测及天文数据观测。

致 谢

本项目得到国家自然科学基金(U1631101, 11665022, 11233006)和上海市自然科学基金(16ZR1417200)联合资助。

参考文献 (References)

- [1] 姚启钧. 光学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [2] 程守洵, 江之永. 普通物理学第3册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [3] 杨述武. 普通物理实验: 光学部分[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [4] 王秀芳, 陈世涛, 邱卫东. 偏振光试验方法的改进[J]. 大学物理实验, 2009, 22(1): 31-32.
- [5] 王晓, 石顺祥, 马琳. 部分偏振光的表示方法[J]. 电子科技, 2009, 22(6): 78-80.
- [6] 卢皓, 赵开春, 马强, 尤政. 采用连续旋转检偏器的天空偏振光探测装置设计与实现[J]. 宇航学报, 2014, 35(9): 1087-1094.
- [7] 刘质斌, 丁剑平, 籍建亭, 张荣, 都有为. 傅里叶磁光谱仪中的起偏器和检偏器的自动定位及误差分析[J]. 中国激光, 2005, 32(5): 663-667.
- [8] 朱化凤, 宋连科, 吴福全, 李国华, 左战春, 范树海. 泰勒检偏棱镜透射比随旋转角周期“抖动”的理论分析[J]. 中国激光, 2004, 31(1): 41-44.
- [9] 龚奥博, 闫振, 沈志强, 吴理歌. 旋转射电暂现源研究进展[J]. 天文学进展, 2015, 33(4): 472-488.
- [10] 蔡履中. 偏振光的杨氏干涉[J]. 大学物理, 2007, 26(6): 1-4.
- [11] 上海交大物理实验中心组. 大学物理实验[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015: 51.
- [12] 陈皓, 史建新. 偏振光的理论分析与实验研究[J]. 沈阳师范大学学报, 2009, 27(4): 424-426.
- [13] 王秀芳, 陈世涛, 邱卫东. 偏振光试验方法的改进[J]. 大学物理实验, 2009, 22(1): 31-32.
- [14] 赵爽, 吴福全, 唐恒敬. 椭圆偏振光与部分偏振光检验的理论分析[J]. 激光技术, 2006, 30(4): 436-438.
- [15] 何圣静. 物理学手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-0916, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: mp@hanspub.org