

偏振光学实验报告

鲁睿 未央软-11 2021012539 2022.10.31

摘要: 光被证实是电磁波是物理学史上的伟大发现，其偏振现象是反映光横波特性的有力证据。通过实验探究光的偏振特性，利用布儒斯特角测定玻璃片折射率，并调整单色光起偏和检偏角度。在偏振装置调整之后，验证偏振光的马吕斯定律，并观测偏振光分别通过半波片和1/4波片后的偏振特性，验证椭圆偏振光特性。

关键词: 偏振片；检偏；马吕斯定律；波片

目录

1 实验仪器

2 实验原理

2.1 布儒斯特角

2.2 马吕斯定律

2.3 波片几何关系

3 实验内容

3.1 自准直法垂直入射

3.2 观测布儒斯特角

3.3 透射光强和偏振器夹角关系

3.4 线偏振光入射波片

3.4.1 $\frac{1}{2}$ 波片或全波片

3.4.2 $\frac{1}{4}$ 波片

4 实验总结

4.1 误差分析

4.1.1 马吕斯定律

4.1.2 波带片

4.2 光强不稳定现象

5 原始数据

1 实验仪器

半导体激光器、偏振片×2（起偏器 P 和检偏器 A ）、玻璃片、 $\frac{1}{4}$ 波带片×2（其中 C_0 大致标明快轴方向， C_x 则未标记）、光强测定仪（含硅光电池、数字电压表、电阻箱）、

2 实验原理

2.1 布儒斯特角

光入射介质表面时，菲涅尔公式给出反射电场和入射电场的复振幅关系

$$\begin{cases} \tilde{r}_p = \frac{E'_p}{E_p} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \\ \tilde{r}_s = \frac{E'_s}{E_s} = \frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \end{cases} \quad (1)$$

该式可得当 $\theta_i + \theta_t = \frac{\pi}{2}$ 时 $\tilde{r}_p = 0$ ，此时反射光为线偏振光，对应角度

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2)$$

2.2 马吕斯定律

设沿透射轴方向振动与沿消光轴方向振动的光强透射率之比为 e ，则振动方向和透射轴方向为 θ 角的线偏振光透射率为

$$T_\theta = (T_1 - T_2) \cos^2 \theta + T_2 \quad (3)$$

2.3 波片几何关系

实际上 $\frac{1}{4}$ 波片的相位差不是严格的 $\frac{\pi}{2}$ ，令椭圆偏振光振动分量表达式

$$\begin{cases} x = E_{0x} \cos(\omega t) \\ y = E_{0y} \cos(\omega t + \delta) \end{cases} \quad (4)$$

可以使用转置矩阵推导椭圆偏振光的长轴方向

$$\tan 2\Psi = \frac{2E_{0x}E_{0y} \cos \delta}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \quad (5)$$

定义 $\beta = \arctan\left(\frac{E_{0y}}{E_{0x}}\right)$ ，代入 $\frac{I_{\min}}{I_{\max}} = \frac{b^2}{a^2}$ 可以将长轴方向以及相位差表示为

$$\begin{cases} \Psi = \frac{1}{2} \arctan(\tan(2\beta) \cdot \cos \delta) \\ |\sin \delta_r| = \frac{2\sqrt{\frac{I_{\min}}{I_{\max}}}}{\sin(2\beta) \left(1 + \frac{I_{\min}}{I_{\max}}\right)} \end{cases} \quad (6)$$

3 实验内容

3.1 自准直法垂直入射

开启激光电源，放上玻璃片，使用一张戳了孔的纸盖住光源，调整底盘角度使得反射光和光源中心重合，该**自准直法**和分光计调节类似，体现光学实验的相通性。

3.2 观测布儒斯特角

1. 在垂直入射的基础上，转动平台 55° 左右，用纸面做接收屏，调节起偏器和小平台角度使得纸面上亮点的光强极小；
2. 调节起偏器角度，使得激光完全消光；
3. 记录下平台读数 α_B 和起偏器 P 方位角 p_{\leftrightarrow} ，此时起偏器透射轴位于水平方向，重复上述过程 3 次。

| | | | |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|
| α_0 | $74^\circ 32'$ | $74^\circ 32'$ | $74^\circ 32'$ |
| α_{Bi} | $18^\circ 47'$ | $20^\circ 12'$ | $19^\circ 38'$ |
| $\alpha_0 - \alpha_{Bi}$ | $55^\circ 45'$ | $54^\circ 20'$ | $54^\circ 54'$ |
| P_{\leftrightarrow} | 269.6° | 270.8° | 271.2° |

表1 布儒斯特角和起偏角度测量表格

计算布儒斯特角以及起偏角度平均值如下

$$\begin{aligned} \overline{\theta_B} &= \frac{55^\circ 45' + 54^\circ 20' + 54^\circ 54'}{3} = 54^\circ 59' \\ \overline{P_{\uparrow}} &= \frac{269.6^\circ + 270.8^\circ + 271.2^\circ}{3} = 270.5^\circ \end{aligned}$$

从而计算折射率为

$$n = \tan \theta_B = \tan 54^\circ 59' = 1.427$$

取 $P_{\leftrightarrow} = \overline{P_{\leftrightarrow}}$ 时，改变角度测量光强，测得检偏器消光时角度 $\alpha_{\uparrow} = 2.9^\circ$ 。

3.3 透射光强和偏振器夹角关系

取定 $R = 100\Omega$, $I_0 = -0.007\text{mV}$, $\bar{P}_{\leftrightarrow} = 270.5^\circ$, $\alpha_{\uparrow} = 2.9^\circ$, 将 P 盘置于平均值位置, 移去玻璃片, 转动检偏器 A 与之消光, 记录下 A 盘读数 α_1 。改变检偏器方位角, 在两偏振片透射轴夹角 θ 为下列定值时测量透射光强。

| θ (度) | 0.0 | 15.0 | 30.0 | 45.0 | 60.0 | 75.0 | 80.0 | 84.0 | 87.0 | 90.0 |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $a = a_{\uparrow} + 90 + \theta$ | 92.9 | 107.9 | 122.9 | 137.9 | 152.9 | 167.9 | 172.9 | 176.9 | 179.9 | 182.9 |
| I_m/mV | 2.661 | 2.545 | 2.096 | 1.44 | 0.769 | 0.243 | 0.109 | 0.077 | 0.025 | 0.008 |
| $I = I_m - I_0$ | 2.653 | 2.537 | 2.088 | 1.432 | 0.761 | 0.235 | 0.101 | 0.069 | 0.017 | 0.000 |
| $\cos^2 \theta$ | 1.0000 | 0.9330 | 0.7500 | 0.5000 | 0.2500 | 0.0670 | 0.0302 | 0.0109 | 0.0027 | 0.0000 |
| I/I_{\max} | 1.0000 | 0.9563 | 0.7870 | 0.5398 | 0.2868 | 0.0886 | 0.0381 | 0.0260 | 0.0064 | 0.0000 |

表2 透射光强和夹角关系表格

绘制 $Y_1 = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}$, $Y_2 = \cos^2 \theta$ 关于 θ 的曲线如下

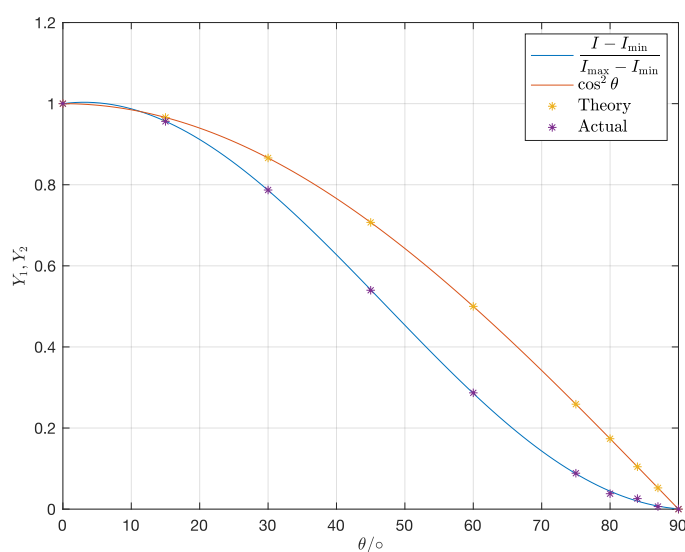


图1 光强归一化和偏振夹角 θ 关系 (实际曲线和理论曲线)

绘制 $\frac{I}{I_{\max}}$ 关于 $\cos^2 \theta$ 的拟合直线, 由于当 $\theta \rightarrow 90^\circ$ 时, 偏振光非理想以及激光为部分偏振光, 从而此时 $I\left(\frac{\pi}{2}\right) \neq 0$, 故选择**不强制经过原点**的线性拟合模型 $Y = aX + b$

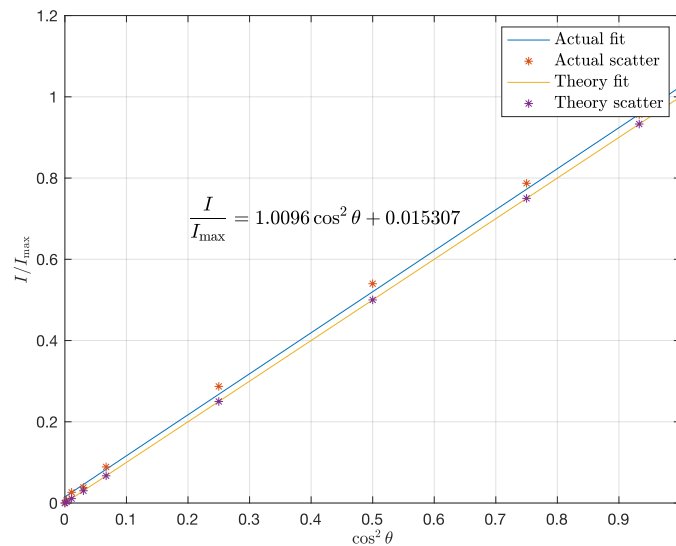


图2 光强归一化和角度余弦平方的关系（实际曲线和理论曲线）

3.4 线偏振光入射波片

3.4.1 $\frac{1}{2}$ 波片或全波片

1. 在起偏器后装上波片 C_0 ，调节方位使得消光，此时快轴位于竖直方向，其快轴方位角 $C_0 = 308.7^\circ$ ；
2. 将待测波片 C_x 放在平台上，使用自准直法调节入射光线与 C_x 垂直，再调节其取向使得检偏器消光，读数 $C_x = 198^\circ$ ；
3. 调整起偏器的角度为特定值，测量消光时 A 的读数 α_i ；
4. 将 $C_0 + 90^\circ$ ，再次消光后以相同方式记录读数。

| | 快轴方向水平 | | | 快轴方向竖直 | | |
|--|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| $\beta = p - \bar{p}_{\leftrightarrow}/^\circ$ | 15.0 | 30.0 | 45.0 | 15.0 | 30.0 | 45.0 |
| $p/^\circ$ | 285.5 | 300.5 | 314.5 | 255.5 | 240.5 | 225.5 |
| $a_i/^\circ$ | 348.8 | 332.9 | 318.8 | 17.8 | 33.7 | 48.6 |
| $\alpha = a_i - a_{\uparrow}/^\circ$ | -14.1 | -30.0 | -44.1 | 14.9 | 30.8 | 45.7 |

表3 偏振光通过全波片或半波片实验数据

由于 P 和 A 的度盘朝向不同，两者逆时针转动时读数大小**变化相反**，即全波片时两者的角度相反，半波片时两者角度相反。

故判定当快轴方向水平时等效为**全波片**，竖直时等效为**半波片**。

3.4.2 $\frac{1}{4}$ 波片

观测线偏振光经过 C_0 后偏振态的改变，置波片 C_0 的快轴于竖直方向，调整起偏器角度，使 β 为给定角度，分别测出透射光的长轴方位角 Ψ 相关的数据、光强最大最小值 I_{\max} 和 I_{\min} 。

| $\beta = p - \bar{p}_{\leftrightarrow}/^\circ$ | 22.5 | 45.0 | 67.5 |
|--|--------|--------|--------|
| $p/^\circ$ | 293.0 | 315.5 | 337.5 |
| 检偏器最大光强位置 $a_i/^\circ$ | 92.3 | 48.3 | 97.2 |
| I_{\max}/mV | 1.501 | 0.870 | 1.001 |
| I_{\min}/mV | 0.257 | 0.816 | 0.172 |
| $\alpha = a_i - a_{\uparrow}/^\circ$ | 89.4 | 45.4 | 94.3 |
| 长轴方位角 $\Psi_1/^\circ$ | -0.6 | 45.4 | -4.3 |
| I_0/mV | -0.007 | -0.007 | -0.007 |
| $(I_{\min} - I_0)/(I_{\max} - I_0)$ | 0.1712 | 0.9384 | 0.1776 |
| $\sin \delta_r$ | 0.9993 | 0.9995 | 1.0005 |
| $\delta_r/^\circ$ | 87.8 | 88.2 | N/A |
| $\Psi_2/^\circ$ | 1.1 | 45.0 | N/A |

表4 线偏振光经过 1/4 波片实验数据

例如其中 $\beta = 45^\circ$ 涉及**取极限操作**，代入公式 (6) 计算过程如下

$$\sin \delta_r = \frac{2\sqrt{\frac{I_{\min}}{I_{\max}}}}{\sin(2\beta) \left(1 + \frac{I_{\min}}{I_{\max}}\right)} = \frac{2\sqrt{0.9384}}{\sin(2 \cdot 45^\circ) (1 + 0.9384)} = \frac{1.9374}{1.9384} \approx 0.99949$$

$$\delta_r \approx \arcsin(0.99949) = 88.18^\circ$$

$$\Psi_2 = \frac{1}{2} \arctan(\tan(2\beta) \cdot \cos \delta) = \lim_{\beta \rightarrow 45^\circ} \frac{1}{2} \arctan\left(\tan 2\beta \cdot \sqrt{1 - 0.99949^2}\right) = 45.0^\circ$$

其余情况计算类似，可以发现通过测量得到的长轴方位角 Ψ_1 与通过光强以及相位差理论计算得到的 Ψ_2 结果相近，相差约几度。

4 实验总结

4.1 误差分析

4.1.1 马吕斯定律

在验证马吕斯定律实验中，理论数据普遍高于理论数据，主要原因是偏振片**消光轴不是理想的**，该方向存在一定透射率，使得透射光强偏高，同时激光存在一定的自然光部分，该部分在垂直方向也不能完全消去，两种情况叠加导致图 1 中 I_{\max} 和 I_{\min} 之差大于理论最大光强，从而计算得到的实际比例小于理论比例。

考虑消光轴透射率为 e ，由线性拟合模型可知， $e \approx 1.5\% \ll 1$ ，说明该偏振片质量欠佳（一般要求 $e \sim 10^{-4}$ ），观察其表面有一定程度的磨损，其内部电子排布可能发生变化导致马吕斯定律验证出现一定偏差。

4.1.2 波带片

测量过程中发现转动检偏器时，其整体框架由于**老化**发生松动，导致角度测量不准确，这也反应在 $\frac{1}{4}$ 波带片中 $\sin \delta$ 大于 1 的测量结果中。

在 $\frac{1}{2}$ 波带片中由于多次测量数据对比角度正负号，可以对半波片和全波片进行判定。

4.2 光强不稳定现象

在测量过程中发现**最大光强测定不稳定**，例如，当测定最大光强和最小光强之后，再次测定最大光强，示数有相应的变化。

有文献表明¹，**He-Ne 激光器每个纵模的偏振方向会随着时间缓慢变化**，并大致成三角函数周期性变化趋势，从而其输出光强不稳定，导致测量光强不稳定，这也间接导致了 $\sin \delta > 1$ 的结果。

可以尝试**快速测量**最大和最小光强，或者等待一定时间对光强**求平均**来避免这一系统误差。

5 原始数据

龙丹 2022.10.31

2022 秋基物 2

偏振 姓名: 鲁青 学号: 202101233 班号: 未定-级 座位号: 12 日期: 2022.10.31

提示: a: 检偏器A(盘)的方位角; p: 起偏器P(盘)的方位角。

4 观测布儒斯特角、起偏器P的透射轴在水平方向的方位角
 光束正入射棱镜表面时平台方位角 $\alpha_{1-0} = 74^{\circ}32'$; 入射角为布氏角时平台方位角 $\alpha_{B1} = 18^{\circ}47'$ ($\alpha_B - \alpha_{1-0} = 55^{\circ}45'$),

$P_{\leftrightarrow 1} = 267.6^{\circ}$; $\alpha_{B2} = 2^{\circ}12'$, $P_{\leftrightarrow 2} = 270.8^{\circ}$; $\alpha_{B3} = 19^{\circ}38'$, $P_{\leftrightarrow 3} = 271.2^{\circ}$.
 平均值 $\alpha_B = 19^{\circ}32'$; 布氏角的测量值 $\theta_B = 54^{\circ}59'$; 折射率 $n = 1.427$ 。

| | |
|---|----------|
| 5 偏振器透射轴方向 | 表4的3次平均值 |
| 起偏器P的透射轴在水平方向的方位角 P_{\leftrightarrow} (度) | 270.5 |
| 检偏器A和P正交时, A的方位角 a_{\uparrow} | 2.9 |

6 透射光强 I_m 与两偏振器夹角 θ 的关系 $R = 100.0 \Omega$; $p = P_{\leftrightarrow}$ (平均值) = 270.5° ; $a_{\uparrow} = 2.9^{\circ}$;

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 夹角 θ (度) | 0.0 | 15.0 | 30.0 | 45.0 | 60.0 | 75.0 | 80.0 | 84.0 | 87.0 | 90.0 |
| $a = a_{\uparrow} + 90 + \theta$ (度) | 92.9 | 107.9 | 122.9 | 137.9 | 152.9 | 167.9 | 172.9 | 176.9 | 179.9 | 182.9 |
| I_m (mV) 测量值 | 2.661 | 2.545 | 2.096 | 1.440 | 0.769 | 0.233 | 0.109 | 0.07 | 0.025 | 0.008 |

7 定波片 C_0 的快轴的方向(度) $R = 100.0 \Omega$; $p = P_{\leftrightarrow}$ (平均值) = 270.5° ; $a = a_{\uparrow} = 2.9^{\circ}$.
 波片 C_0 快轴在竖直方向时, 度盘示值 $C_0 = 303.7^{\circ}$

8 定波片 C_x 的轴的方向(度) $R = 100.0 \Omega$; $p = P_{\leftrightarrow}$ (平均值) = 270.5° ; $a = a_{\uparrow} = 2.9^{\circ}$.
 波片 C_x 的1个轴在竖直方向时, 度盘示值 $C_x = 198^{\circ}$.

9&10 线偏振光通过1/2波片或全波片

9) C_x 某轴在竖直方向, 度盘示值 $C_x = 198^{\circ}$. C_0 快轴在竖直方向。 10) C_x 方位不变, C_0 快轴在水平方向, $C_0 = 303.7^{\circ}$.

| | | | | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\beta = p - p_{\leftrightarrow}$ (度) | 15.0 | 30.0 | 45.0 | 15.0 | 30.0 | 45.0 |
| p (度) | 285.5 | 300.5 | 314.5 | 255.5 | 240.5 | 225.5 |
| 消光时A盘度盘读数 a_i (度) | 343.8 | 332.9 | 318.8 | 17.8 | 33.7 | 43.6 |
| $\alpha = a_i - a_{\uparrow}$ (度) | -14.1 | -30.0 | -44.1 | 14.9 | 30.8 | 45.7 |

建议: 每个 β 角测量前: A盘方位角初始化为 a_{\uparrow} .

11 线偏振光经过1/4波片 $C_0 = 303.7^{\circ}$ $R = 100.0 \Omega$

| | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--|--------|--------|-----------------|--------|--------|--------|----------------|------|------|----|
| $\beta = p - p_{\leftrightarrow}$ (度) | 22.5 | 45.0 | 67.5 | | | | | | | | |
| p (度) | 293.0 | 315.5 | 337.5 | | | | | | | | |
| A盘透射轴在长轴方向时的 a_i (度) | 92.3 | 48.3 | 97.2 | | | | | | | | |
| I_{max} (mV) (最大光强) | 1.501 | 0.870 | 1.001 | | | | | | | | |
| I_{min} (mV) (最小光强) | 0.257 | 0.816 | 0.172 | | | | | | | | |
| $\alpha = a_i - a_{\uparrow}$ (度) | 89.4 | 45.4 | 94.3 | | | | | | | | |
| 利用 α 计算长轴方位角 ψ (度) | -0.6 | 45.4 | -4.3 | | | | | | | | |
| $b^2/a^2 \approx I_{min}/I_{max}$ | 0.1712 | 0.9379 | 0.1718 | | | | | | | | |
| 利用(13)式计算 | <table border="1"> <tr> <td>$\sin \delta_r$</td> <td>0.9993</td> <td>0.9995</td> <td>1.0005</td> </tr> <tr> <td>δ_r (度)</td> <td>87.8</td> <td>88.2</td> <td>无解</td> </tr> </table> | | | $\sin \delta_r$ | 0.9993 | 0.9995 | 1.0005 | δ_r (度) | 87.8 | 88.2 | 无解 |
| $\sin \delta_r$ | 0.9993 | 0.9995 | 1.0005 | | | | | | | | |
| δ_r (度) | 87.8 | 88.2 | 无解 | | | | | | | | |
| 利用(2)式计算 ψ (度) | 1.1 | 45.0 | 0 | | | | | | | | |

建议: 每个 β 测量前: A盘方位角初始化为 a_{\uparrow} .
 ψ : 转换到 $[-90^{\circ}, 90^{\circ}]$ 区间
 I_0 : 反应背景光、光电池暗电流、噪声、寄生电势和电表零点漂移等的综合影响。

I_0 (挡住光源时) = $-0.007 mV$

图3 原始数据截图

[1]魏茂金. 硅光电池实验输出光强不稳定现象的研究[J]. 三明学院学报, 2007, (04): 383-385.