

偏振光学实验

2017011620 计 73 李家昊

实验日期：2019/3/21

1. 实验目的

- (1) 理解偏振光的基本概念，偏振光的起偏与检偏方法。
- (2) 学习偏振片与波片的工作原理和使用方法。

2. 实验原理

(1) 光波偏振态的描述

按光波电矢量的振动状态可将光波偏振态分为五种：自然光、部分偏振光、椭圆偏振光、圆偏振光和线偏振光。

一个单色偏振光可分解为两个偏振方向垂直的线偏振光的叠加：

$$\begin{cases} E_x = a_1 \cos \omega t \\ E_y = a_2 \cos(\omega t + \delta) \end{cases} \quad (a_1, a_2 > 0, 0 \leq \delta < 2\pi) \quad (1)$$

当 $\delta = 0, \pi$ 时，式(1)描述线偏振光，偏振方向与 x 轴夹角（方位角）为 $\alpha = \arctan(\frac{a_2}{a_1} \cos \delta)$ 。

当 $\delta = \frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2}$ 且 $a_1 = a_2$ 时，式(1)描述圆偏振光， $\delta = \frac{\pi}{2}$ 时为右旋圆偏振光， $\delta = -\frac{\pi}{2}$ 时为左旋圆偏振光。

一般情况下，式(1)描述椭圆偏振光。描述椭圆偏振光需要光强、椭圆长轴方位角 ϕ ，椭圆短半轴 b 与长半轴 a 之比和椭圆的旋向四个参量。其中

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{1}{2} \arctan(\tan 2\beta \cdot \cos \delta) \\ \frac{b^2}{a^2} &= \frac{2}{1 + \sqrt{1 - (\sin \delta \cdot \sin 2\beta)^2}} - 1 \end{aligned}$$

式中定义辅助角 $\beta = \arctan(a_2/a_1)$ 。

(2) 偏振片

沿透射轴方向振动的光波的光强透射率为 $T_1 < 1$ ，沿消光轴方向振动的光波的光强透射率为 $T_2 > 0$ ，这两个透射率成为主透射率。定义消光比

$$e = \frac{T_2}{T_1}$$

由马吕斯定律，振动方向和透射轴方向成 θ 角的线偏振光经过偏振片后透射率

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

完全非偏振光经过两个透射轴成 θ 角且主透射率相同的偏振器后，总透射率为

$$T_\theta = \frac{1}{2} (T_1^2 + T_2^2) \cos^2 \theta + T_1 T_2 \sin^2 \theta$$

实验中测出 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 和 $\theta = 0$ 时的总透射率 T_\perp 和 T_\parallel 之比，即 I_{\min}/I_{\max} ，即可计算出消光比 e

$$\frac{I_{min}}{I_{max}} = \frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}} = \frac{2T_1T_2}{T_1^2 + T_2^2} = \frac{2e}{1+e^2} \approx 2e$$

对于理想的检偏器，透射轴平行于椭圆长轴时透射光强为正比于 a^2 的极大值 I_{max} ，透射轴平行于椭圆短轴时透射光强为正比于 b^2 的极小值 I_{min} ，可通过旋转检偏器的透射轴方向，用光强探测器示数确定出椭圆长轴方位角 ϕ 和光强极值比 $b^2/a^2 = I_{min}/I_{max}$ 。

(3) 延迟器和波片

设位相延迟器厚度为 d ，快慢轴方向振动的线偏振光折射率分别为 n_f, n_s ，则相延迟

$$\delta_r = \frac{2\pi(n_s - n_f)d}{\lambda_0} = \frac{\omega(n_s - n_f)d}{c_0}$$

其中 c_0, λ_0 为真空中的光速和波长， ω 为光波圆频率。

1/4 波片的 $\delta_r = 2\pi N \pm \pi/2$ ，1/2 波片的 $\delta_r = (2N + 1)\pi$ ，全波片的 $\delta_r = 2\pi N$ 。

使用波片时首先要确定快慢轴方向，将待测波片 C 放在已正交消光的偏振器 P 和 A 之间，旋转 C，使三者仍然保持消光状态，则波片 C 的一个轴平行于 P 的透射轴方向。将待测 1/4 波片的轴和另一 1/4 波片的已知快轴方向平行，合成一个半波片或全波片，若经过测量判断出合成波片类型，就能判断出待测波片的快轴方向。

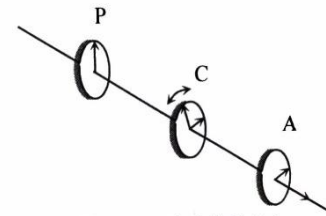


图 8 1/4 波片轴的确定

测定 1/4 波片的相延 δ_r ：入射一束方位角为 β 的线偏振光，经过相延为 δ_r 的波片后，由光强探测器测得透射光强极值比 I_{min}/I_{max} ，得到：

$$|\sin \delta_r| = \frac{2\sqrt{\frac{I_{min}}{I_{max}}}}{\sin(2\beta)(1 + \frac{I_{min}}{I_{max}})}$$

其中 δ_r 的符号根据椭圆偏振光的旋向来决定。

(4) 反射和折射时的起偏现象

平面电磁波以入射角 θ_i 由空气中投射到折射率为 n 的无吸收介质表面，反射角 θ_r ，折射角 θ_t 满足

$$\theta_i = \theta_r \quad \sin \theta_t = \sin \theta_i / n$$

将入射波分解为电矢量分别平行或垂直于入射面的两个分量 P 和 S，光强反射率、透射率分别为

$$R_P = r_P^2 = \left(\frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \right)^2, \quad T_P = 1 - R_P$$

$$R_S = r_S^2 = \left(\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \right)^2, \quad T_S = 1 - R_S$$

当 $\theta_i + \theta_t = \pi/2$ 时, 即

$$\theta_i = \arctan n = \theta_B$$

时, $R_P = 0$, 这一特征角 θ_B 为布儒斯特角。

可根据布儒斯特角判断偏振器的透射轴方向。如图 11, 玻璃片折射率 $n \approx 1.5$, 预置入射角 $\theta_i \approx 57^\circ$, 反复调节入射角 θ_i 及 P 的方位角使反射光点最暗, 即可确定布儒斯特角, 判断出 P 的透射轴方向平行于入射面。

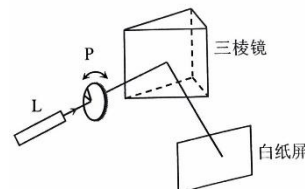


图 11 偏振器的透射轴方向的确定

3. 实验仪器

- (1) 半导体激光器
- (2) 起偏器 P, 检偏器 A
- (3) 两个 1/4 波片 C_0, C_x
- (4) 光强探测器

4. 实验步骤

准备

- (1) 开启激光电源, 调整激光器偏振方向的方位。
- (2) 调整起偏器和检偏器的方位、俯仰。
- (3) 调小平台与分光计主轴基本垂直。

观测布儒斯特角和偏振器特性

- (4) 观测布氏角

将棱镜放在小平台上, 反射面过平台中心点, 使光束入射角为 57° 。

用图 11 方法调整, 确定入射角为 θ_B 时的平台方位角读数 α_B 。

用纸片扎一小孔放在激光器出射光束处, 调整使棱镜表面反射光束在纸屏上的亮点于激光器出射光束重合, 此时入射角为 0° , 记下方位角 $\alpha_{i=0}$ 。

则布儒斯特角 $\theta_B = \alpha_B - \alpha_{i=0}$ 。

- (5) 定偏振器透射轴方向

步骤(4)中起偏器 P 的透射轴方位必位于水平方向, 度盘读数为 p_{\leftrightarrow} 。重复测量 6 次, 取平均值, 作为透射轴在水平方向时的 P 盘方位角。

置 P 盘于平均值位置, 移去棱镜, 转动检偏器 A 使之于 P 正交消光, 记下 A 盘的度盘读数 α_{\uparrow} 。

- (6) 测消光比 e

P 盘不动, 转动 A 盘, 记下透射光强极大值 I_{max} 和极小值 I_{min} , 计算出消光

比。

(7) 测量透射光强 I_m 和两偏振器夹角 θ 的关系

在两偏振器夹角 $\theta = 0, 15, 30, 45, 60, 75, 80, 84, 87, 90$ 度时测量光强，画出相对透射率随 θ 变化的曲线与 $\cos^2 \theta$ 随 θ 变化的曲线。

1/4 波片特性研究

(8) 确定波片 C_0 的快轴方向

调节快轴位于竖直方向，使其消光，读出刻度盘方位角。

(9) 线偏振光经过 1/4 波片

置波片 C_0 的慢轴于水平方向，在起偏器的透射轴和慢轴夹角 $\beta = 0, 22.5, 45, 67.5, 90$ 度时，测出透射光的长轴方位角 φ 和光强极值比 $b^2/a^2 \approx I_{min}/I_{max}$ ，比较理论分析。

(10) 确定待测波片 C_x 的轴方向

放上 C_x ，使光束垂直通过，定出其某一轴在竖直方向时的度盘示数。

(11) 观测偏振光通过 1/2 波片或全波片的现象

令 C_0 快轴和 C_x 的某一轴平行，观测线偏振光经过这两个 1/4 波片后偏振态的改变，判断 C_x 快轴方向。

(12) 观测偏振光通过 1/2 波片或全波片的现象

令 C_0 慢轴和 C_x 的某一轴平行，观测线偏振光经过这两个 1/4 波片后偏振态的改变，判断 C_x 快轴方向。

***观测反射光的偏振面旋转的现象**

(13) 观测反射光偏振态改变的现象

取下 C_0 和 C_x ，使 P 的透射轴与水平方向成 45° ，放反射试块，当入射角 $i = 50, 56, 65, 70, 75, 80, 85$ 度时分别测量出反射光的线偏方向，比较理论结果，说明原因。

5. 数据处理

4. 观察布儒斯特角

光束正入射棱镜表面时平台方位角 $\alpha_{i=0} = 0$

入射角为布儒斯特角时平台方位角 $\alpha_B = 303^\circ 25'$

布儒斯特角测量值 $\theta_B = \alpha_B - \alpha_{i=0} = 56^\circ 35'$

由此算出折射率 $n = \tan \theta_B = 1.52$

n 的相对误差

$$\frac{n - 1.54}{1.54} \times 100\% = -1.58\%$$

5. 测定偏振器透射轴方向

序号	1	2	3	4	5	6	标准差	$\overline{p_{\leftrightarrow}}$	a_{\uparrow}
$p_{\leftrightarrow}(^{\circ})$	91.4	91.4	91.7	90.8	91.4	91.3	0.269	91.3	183.3

$$\overline{p_{\leftrightarrow}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 p_{\leftrightarrow i} = 91.3^{\circ}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (p_{\leftrightarrow i} - \overline{p_{\leftrightarrow}})^2} = 0.269^{\circ}$$

6. 测消光比 e

$R_2=200\Omega$	$I_{\max}(\text{mV})$	$I_1=4.671$	$I_3=4.734$	$I_5=4.680$	$I_7=4.736$
$R_1=200\Omega$	$I_{\min}(\text{mV})$	$I_2=0.002$	$I_4=0.002$	$I_6=0.002$	

挡住光源时, $I_0=0.001 \text{ mV}$

计算消光比

$$e = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{I_4 + I_6 - 2I_0}{4I_5} = \frac{200}{200} \cdot \frac{0.002 + 0.002 - 2 \times 0.001}{4 \times 4.680} = 1.07 \times 10^{-4}$$

7. 测量透射光强 I_m 与两偏振器夹角 θ 间的关系

电阻箱示数 $R = 100\Omega$, $p = \overline{p_{\leftrightarrow}} = 91.3^{\circ}$; $a_{\uparrow} = 183.3^{\circ}$; $I_{\max} = I_m$ (夹角为 0 时)

$\theta(^{\circ})$	0	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0	80.0	84.0	87.0	90.0	0
$a=a_{\leftrightarrow}+90^{\circ}+\theta$	273.3	288.3	303.3	318.3	333.3	348.3	353.3	357.3	0.3	3.3	273.3
$I_m(\text{mV})$	4.741	4.443	3.592	2.410	1.129	0.338	0.160	0.063	0.020	0.002	4.752
$I_c \approx I_{\max}(\cos \theta)^2 + I_{\min}$	※	4.425	3.558	2.373	1.187	0.320	0.145	0.054	0.015	0.002	※
$ I_c - I_m /I_m(\%)$	※	0.405	0.947	1.535	5.137	5.325	9.375	14.516	26.316	0.000	※

计算过程 (以 $\theta = 15.0^{\circ}$ 为例, 其他以此类推)

$$I_c \approx I_{\max}(\cos \theta)^2 + I_{\min} = 4.741 \times (\cos 15.0^{\circ})^2 + 0.002 = 4.425 \text{ mV}$$

$$\frac{|I_c - I_m|}{I_m} = \frac{|4.425 - 4.443|}{4.443} \times 100\% = 0.405\%$$

特别的:

$\theta = 84.0^{\circ}$ 时,

$$\frac{|I_c - I_m|}{|I_m - I_0|} = \frac{|0.054 - 0.063|}{|0.063 - 0.001|} \times 100\% = 14.516\%$$

$\theta = 87.0^{\circ}$ 时,

$$\frac{|I_c - I_m|}{|I_m - I_0|} = \frac{|0.015 - 0.020|}{|0.020 - 0.001|} \times 100\% = 26.316\%$$

$\theta = 90.0^\circ$ 时,

$$\frac{|I_c - I_m|}{|I_m - I_0|} = \frac{|0.002 - 0.002|}{|0.002 - 0.001|} \times 100\% = 0$$

作出相对透射率与 $\cos^2 \theta$ 随 θ 变化的图像如下

相对透射率

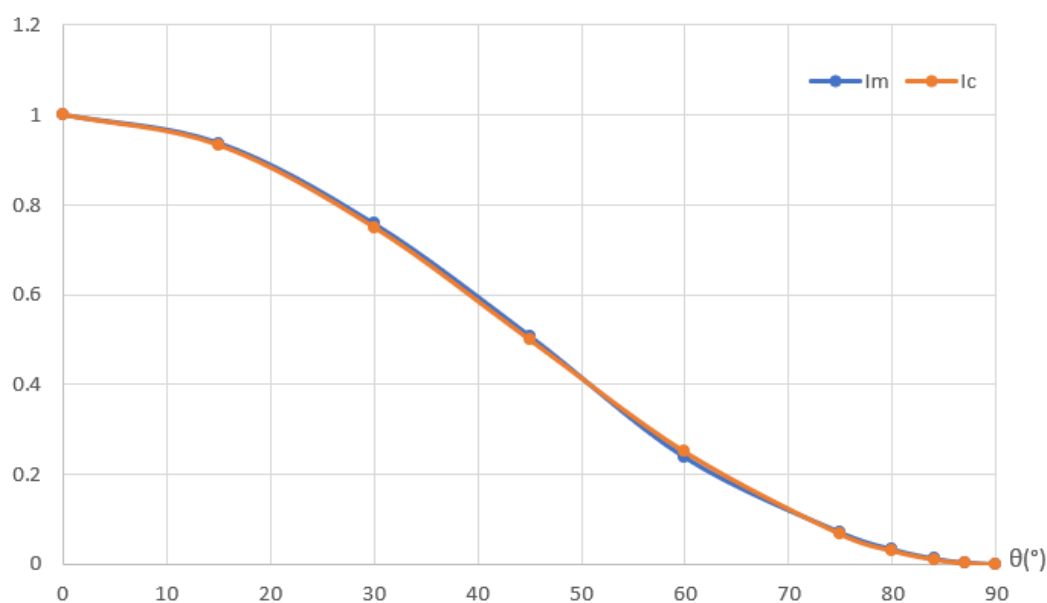


图 1 I_m/I_{max} 与 $\cos^2 \theta$ 随 θ 变化的曲线

由图可知, $I_m/I_{max} \sim \theta$ 曲线与 $\cos^2 \theta \sim \theta$ 曲线重合程度较高, 证明了马吕斯定律的正确性。

8. 定波片 C_0 快轴方向

已知 $\bar{p}_{\leftrightarrow} = 91.3^\circ$, $a_{\uparrow} = 183.3^\circ$

波片 C_0 快轴在竖直方向时度盘示值 $C_0 = 271.6^\circ$

9. 线偏振光通过 1/4 波片

C_0 度盘示值 $C_0 = 271.6^\circ$

$\beta = p - p_{\leftrightarrow} (^\circ)$	0.0	22.5	45.0	67.5	43.0
$p = \beta + p_{\leftrightarrow} (^\circ)$	91.3	113.8	136.3	158.8	134.3
A 盘透射轴在长轴方向读数 $a_i (^\circ)$	94.1	272.3	224.9	178.0	257.0
长轴方位角 $\phi = a_{\uparrow} + 90 - a_i (^\circ)$	179.2	1.0	48.4	95.3	16.3
$I_{max} (mV)$	2.835	1.568	0.355	0.035	0.367

$I_{\min}(\text{mV})$	0.002	0.263	0.315	0.007	0.326
$b^2/a^2 \approx I_{\min}/I_{\max}$	7.05×10^{-4}	0.168	0.887	0.200	0.888
$\delta_r(^{\circ})$	※	83.007	86.567	无解	无解
$\phi(^{\circ})$	※	3.471	无解	无解	无解

当 $\beta = 0.0^{\circ}$ 时，理论分析表明透射光为线偏振光，实际测得

$$\frac{b^2}{a^2} \approx 7.05 \times 10^{-4} \approx 0$$

近似为线偏振光。

当 $\beta = 45.0^{\circ}$ 时，理论分析表明透射光为圆偏振光，实际测得

$$\frac{b^2}{a^2} \approx 0.887 \approx 1$$

近似为圆偏振光。

可见，理论分析与实际测量结果相符。

10. 定波片 C_x 的轴方向

已知 $\overline{p_{\leftrightarrow}} = 91.3^{\circ}$, $a_{\uparrow} = 183.3^{\circ}$

波片 C_x 的一个轴在竖直方向时度盘示值 $C_x = 63^{\circ}$

由于 C_0 的快轴方向与 P 透射轴垂直，因此入射光通过 C_0 后仍为线偏振光，考虑 C_0 的存在不会影响 C_x 轴的确定。

11. 线偏振光通过 1/2 波片或全波片

C_x 某轴在竖直方向，度盘示值 $C_x = 63^{\circ}$

C_0 快轴在竖直方向，度盘示值 $C_0 = 271.6^{\circ}$

$p - p_{\leftrightarrow}(^{\circ})$	0.0	15.0	30.0	45.0
$p(^{\circ})$	91.3	106.3	121.3	136.3
消光时 A 盘读数 $a_i(^{\circ})$	183.3	197.1	213.6	227.6
$a_{\uparrow} - a_i(^{\circ})$	0	-13.8	-30.3	-44.3

12. 线偏振光通过 1/2 波片或全波片

C_x 某轴在竖直方向，度盘示值 $C_x = 63^{\circ}$

C_0 快轴在水平方向，度盘示值 $C_0 = 181.6^{\circ}$

$p - p_{\leftrightarrow}(^{\circ})$	0.0	15.0	30.0	45.0
$p(^{\circ})$	91.3	106.3	121.3	136.3
消光时 A 盘读数 $a_i(^{\circ})$	184.1	169.6	156.8	140.0
$a_{\uparrow} - a_i(^{\circ})$	-0.8	13.7	26.5	43.3

分析 11, 12 中 C_x 快轴方向：

若两个 1/4 波片的快轴互相平行，则组成 1/2 波片。线偏振光通过时，振动方向

相反，旋转入射光时，透射光反方向旋转。因此，11 中 C_x 快轴在竖直方向，组成 $1/2$ 波片。

若两个 $1/4$ 波片的快轴互相垂直，则组成全波片。线偏振光通过时，振动方向不变，旋转入射光时，透射光同方向旋转。因此，12 中 C_x 快轴在竖直方向，组成全波片。

综上，11，12 中的 C_x 快轴均在竖直方向。

6. 思考题

思考题 1：如何由几个相同的 $1/4$ 波片构成 $1/2$ 波片和全波片？如何判断波片是 $1/2$ 波片和全波片？

答：(1) 当两个 $1/4$ 波片的快轴相互平行时，构成 $1/2$ 波片。

当两个 $1/4$ 波片的快轴相互垂直时，构成全波片。

(2) 由对 11，12 波片类型的分析知：可以旋转入射的线偏振光，若透射光反方向旋转，则为 $1/2$ 波片。若透射光同方向旋转，则为全波片。

思考题 2：在光隔离器中，讨论波片快慢轴与 P 透射轴应满足的位置关系及光隔离器原理。

答：位置关系：波片快慢轴与 P 透射轴夹角为 45° 。

原理：光通过偏振片 P 后，成为线偏振光，振动方向与 P 透射轴平行，再通过与偏振片 P 夹角为 45° 的波片，变为圆偏振光，在表面 M 反射后，由于存在半波损失，圆偏振光旋向改变，反向通过 $1/4$ 波片时，变为线偏振光，振动方向与 P 透射轴垂直，无法通过偏振片 P，由此实现对反射光波的隔离。

7. 实验小结

通过本次光学实验，我加深了对偏振光概念的理解，基本掌握了偏振片和波片的基本原理和使用方法，验证了马吕斯定律的正确性。

同时，我也体会到科学研究的严谨性和精确性，认识到实验在科研中的重要性。最后，感谢老师的详细讲解和耐心指导！